

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR



FACULTAD DE INGENIERÍA

INGENIERÍA CIVIL

Evaluación de iluminación en los túneles: Cerro Santa Ana, El Carmen, San Eduardo de la ciudad de Guayaquil, basándose en la Normativa Técnica de Carreteras de España “Orden Circular 36/2015”.

AUTOR:

Daniel Alejandro Villagómez Silva

**TRABAJO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO
CIVIL**

Director: Ing. Wilson Cando

QUITO, enero 2018

DEDICATORIA

Dedico esta Tesis a mi Padre, a mi Madre, a mi Hermana, a mi Abuelito Estuardo y a mi Abuelita Piedad, que me han brindado todo su apoyo y cariño para llegar hasta donde estoy en este momento.

Daniel Villagómez Silva

RESUMEN

El presente proyecto de disertación trata de la Evaluación de la iluminación existente en los túneles: Cerro Santa Ana, El Carmen, San Eduardo de la ciudad de Guayaquil, basándose en la Normativa Técnica de Carreteras de España “Orden Circular 36/2015”. Los túneles son obras civiles que forman parte de vías y carreteras, estos deben cumplir ciertos requerimientos estrictos para brindar la adecuada seguridad y confort a los usuarios que circula a través de estos, debido a esto, se realizó el diseño de luminancia para los túneles antes mencionados, basándonos en la normativa actual española para iluminación de túneles de carretera. Teniendo estos resultados de diseño, se los comparó con los valores de luminancia existentes dentro de los túneles para de esta forma comprobar si los túneles por los que circulamos a diario están brindando la seguridad que merecemos, o si necesitan algún tipo de intervención.

ABSTRACT

The present dissertation project covers the Evaluation of the actual illumination inside the: Cerro Santa Ana, El Carmen, San Eduardo, tunnels in the city of Guayaquil, on the basis of the Spanish Highway Technical Standard “Orden Circular 36/2015”. Tunnels are civil works that are part of roads and highways, these must meet some stringent requirements to provide the proper safety and confort for the people that drive through these strcutures, because of that, it had been made the luminance design for the tunnels bedore mentioned, on the basis of the current Spanish standard for highway illumination. Having these disign results, they had been compared with the actual luminance inside the tunnels, so we can check if the tunnels where we daily drive through, are providing the safety that we deserve, or if it is needed any kind of assistance.

Índice

CAPÍTULO I	1
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. JUSTIFICACIÓN.....	1
1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	1
1.3. OBJETIVOS.....	2
1.3.1. Objetivos Generales	2
1.3.2. Objetivos Específicos.....	2
1.4. ALCANCE	2
1.5. ANTECEDENTES	3
1.3.3. TUNEL CERRO SANTA ANA	3
1.3.4. TUNEL CERRO EL CARMEN	5
1.3.5. TUNELES SAN EDUARDO	6
CAPÍTULO II	9
2. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL	9
2.1. MARCO TEÓRICO	9
2.2. TÚNELES	10
2.2.1. DEFINICIÓN DE TÚNEL	10
2.2.2. HISTORIA DE LOS TÚNELES	11
2.2.3. DISEÑO DE TUNELES	13
2.3. ILUMINACIÓN EN TÚNELES	16
2.3.1. CARACTERÍSTICAS Y REQUISITOS DE ILUMINACIÓN EN TÚNELES	16
2.3.2. ASPECTOS QUE TOMAR EN CUENTA PARA EL DISEÑO DE LA ILUMINACIÓN.....	18
2.3.3. ZONAS DE ILUMINACIÓN DEL TUNEL	20
2.3.4. CLASIFICACIÓN DE LOS TÚNELES.....	21
2.3.5. SISTEMAS DE ALUMBRADO ARTIFICIAL	25
2.3.6. PROBLEMÁTICAS DE VISIÓN EN LOS TÚNELES	28
2.3.7. CONTROL DEL NIVEL DE LUMINANCIA EN TÚNELES	32
2.3.8. INSTRUMENTOS PARA LA MEDICION DE LUMINANCIA.....	32
CAPÍTULO III	35
3. DISEÑO DE ALUMBRADO DE TÚNELES	35
3.1. PROCEDIMIENTO PARA DISEÑO DEL ALUMBRADO.....	35

3.1.1.	DISTANCIA DE PARADA D_p	35
3.1.2.	ZONA DE ACCESO (L_{20})	36
3.1.3.	ZONA DE UMBRAL (L_{th})	41
3.1.4.	ZONA DE TRANSICIÓN (L_{tr})	43
3.1.5.	ZONA INTERIOR (L_{in})	45
3.1.6.	ZONA DE SALIDA (L_{ex})	45
3.1.7.	ALUMBRADO NOCTURNO	46
3.2.	DISEÑO DEL ALUMBRADO	47
3.2.1.	DISTANCIA DE PARADA D_p	47
3.2.2.	LUMINANCIA DE LA ZONA DE ACCESO L_{20}	48
3.2.3.	LUMINANCIA DE LA ZONA DE UMBRAL L_{th}	54
3.2.4.	LONGITUD DE LA ZONA DE UMBRAL	55
3.2.5.	LUMINANCIA DE LA ZONA DE TRANSICIÓN L_{tr}	56
3.2.6.	LONGITUD DE LA ZONA DE TRANSICIÓN	60
3.2.7.	LUMINANCIA DE LA ZONA INTERIOR L_{in}	60
3.2.8.	LUMINANCIA DE LA ZONA DE SALIDA L_{ex}	61
CAPÍTULO IV		62
4.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	62
4.1.	TÚNEL CERRO SANTA ANA	62
4.2.	TÚNEL CERRO EL CARMEN	65
4.3.	TÚNEL SAN EDUARDO DIRECCIÓN NORTE	68
4.4.	TÚNEL SAN EDUARDO DIRECCIÓN SUR	71
4.5.	COMPARACION DE RESULTADOS OBTENIDOS	74
4.6.	EFFECTO AGUJERO NEGRO EN LOS TUNELES EVALUADOS	78
4.7.	EVALUACION DE LA ILUMINACION	79
4.8.	PROPUESTA DE MEJORA DE NORMA ECUATORIANA	80
CAPITULO V		82
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	82
5.1.	CONCLUSIONES	82
5.2.	RECOMENDACIONES	83
BIBLIOGRAFÍA		85

Índice de Tablas

Tabla 1. Velocidades de Circulación en Túneles Evaluados	18
Tabla 2. Clasificación de Túneles Evaluados según su Longitud	22
Tabla 3. Intensidad de Tráfico de la hora punta	23
Tabla 4. Clasificación de los Túneles Evaluados según la Intensidad de Tráfico	23
Tabla 5. Clasificación de los Túneles Evaluados según la Composición del Tráfico	24
Tabla 6. Tipo de Alumbrado Requerido en los Túneles Evaluados	24
Tabla 7. Clase de Alumbrado de Túneles	25
Tabla 8. Clase de Alumbrado en Túneles Evaluados	25
Tabla 9. Sistema de Alumbrado de Túneles Evaluados	27
Tabla 10. Existencia de Instrumentos de Control en Túneles Evaluados	32
Tabla 11. Valores Habituales de Luminancia media L20 en la Zona de Acceso	38
Tabla 12. Valores de Luminancia para Distintas Superficies	41
Tabla 13. Valores Recomendados del Coeficiente de Poder Revelador ($k = L_{th} / L_{20}$)	42
Tabla 14. Luminancia Media de la Superficie de la Calzada de la Zona Interior en (cd/m ²)	45
Tabla 15. Distancias de Parada para Velocidad de Circulación de 50km/h	47
Tabla 16. Distancias de Parada para los Túneles Evaluados	48
Tabla 17. Componentes de L20 del Túnel Cerro Santa Ana	49
Tabla 18. Componentes de L20 del Túnel Cerro El Carmen	51
Tabla 19. Componentes de L20 del Túnel San Eduardo Dirección Norte	52
Tabla 20. Componentes de L20 del Túnel San Eduardo Dirección Sur	54
Tabla 21. Coeficiente de Poder Revelador "k" para los Túneles Evaluados	54
Tabla 22. Longitud de Zona de Umbral de los Túneles Evaluados	55
Tabla 23. Niveles de Ltr del Túnel Cerro Santa Ana	56
Tabla 24. Niveles de Ltr del Túnel Cerro El Carmen	57
Tabla 25. Niveles de Ltr del Túnel Cerro San Eduardo Dirección Norte	58
Tabla 26. Niveles de Ltr del Túnel Cerro San Eduardo Dirección Sur	59
Tabla 27. Longitud de Zona de Transición de los Túneles Evaluados	60
Tabla 28. Luminancia de la Zona Interior de los Túneles Evaluados	60

Tabla 29. Luminancia de la Zona de Salida de los Túneles Evaluados	61
Tabla 30. Propiedades del Túnel Cerro Santa Ana	62
Tabla 31. Niveles de Luminancia del Túnel Cerro Santa Ana.....	62
Tabla 32. Niveles de Luminancia Existente en el Túnel Cerro Santa Ana	64
Tabla 33. Propiedades del Túnel Cerro El Carmen.....	65
Tabla 34. Niveles de Luminancia del Túnel Cerro El Carmen	65
Tabla 35. Niveles de Luminancia Existente en el Túnel Cerro El Carmen	67
Tabla 36. Propiedades del Túnel San Eduardo Dirección Norte	68
Tabla 37. Niveles de Luminancia del Túnel San Eduardo Dirección Norte.....	68
Tabla 38. Niveles de Luminancia Existente en el Túnel San Eduardo Dirección Norte	70
Tabla 39. Propiedades del Túnel San Eduardo Dirección Sur	71
Tabla 40. Niveles de Luminancia del Túnel San Eduardo Dirección Sur	71
Tabla 41. Niveles de Luminancia Existente en el Túnel San Eduardo Dirección Sur.....	73
Tabla 42. Presencia de Efecto Agujero Negro en Túneles Evaluados	79
Tabla 43. Evaluación de Correcta Iluminación en los Túneles Evaluados	80

Índice de Figuras

Figura 1. Diagramas Típicos del Coeficiente en Función de la Velocidad para Pavimento Seco y Húmedo	36
Figura 2. Zona de Transición Decreciente	44
Figura 3. Zona de Transición Decreciente del Túnel Cerro Santa Ana	56
Figura 4. Zona de Transición Decreciente del Túnel Cerro El Carmen.....	57
Figura 5. Zona de Transición Decreciente del Túnel San Eduardo Dirección Norte	58
Figura 6. Zona de Transición Decreciente del Túnel San Eduardo Dirección Sur	59
Figura 7. Niveles de Luminancia del Túnel Cerro Santa Ana	63
Figura 8. Porcentaje de Luminancia del Túnel Cerro Santa Ana.....	63
Figura 9. Niveles de Luminancia Existente en el Túnel Cerro Santa Ana.....	64

Figura 10. Niveles de Luminancia del Túnel Cerro El Carmen.....	66
Figura 11. Porcentaje de Luminancia del Túnel Cerro El Carmen	66
Figura 12. Niveles de Luminancia Existente en el Túnel Cerro El Carmen	67
Figura 13. Niveles de Luminancia del Túnel San Eduardo Dirección Norte.....	69
Figura 14. Porcentaje de Luminancia del Túnel San Eduardo Dirección Norte	69
Figura 15. Niveles de Luminancia Existente en el Túnel San Eduardo Dirección Norte.....	70
Figura 16. Niveles de Luminancia del Túnel San Eduardo Dirección Sur	72
Figura 17. Porcentaje de Luminancia del Túnel San Eduardo Dirección Sur	72
Figura 18. Niveles de Luminancia Existente en el Túnel San Eduardo Dirección Sur	73
Figura 19. Luminancia de Diseño vs Luminancia Existente del Túnel Cerro Santa Ana	74
Figura 20. Luminancia de Diseño vs Luminancia Existente del Túnel Cerro El Carmen	75
Figura 21. Luminancia de Diseño vs Luminancia Existente del Túnel San Eduardo Dirección Norte.....	76
Figura 22. Luminancia de Diseño vs Luminancia Existente del Túnel San Eduardo Dirección Sur	77
Figura 23. Porcentaje de los Túneles Evaluados que Cumplen con la Normativa Española	78

Índice de Ilustraciones

Ilustración 1. Túnel Cerro Santa Ana.....	4
Ilustración 2. Túnel Cerro El Carmen	6
Ilustración 3. Túnel San Eduardo.....	8
Ilustración 4. Sección Transversal de Túnel Rectangular	13
Ilustración 5. Sección Transversal de Túnel Circular	14
Ilustración 6. Sección Transversal de Túnel de Herradura	14

Ilustración 7. Elementos de Sección Transversal del Túnel	15
Ilustración 8. Zonas del Túnel y Valores de Luminancia	21
Ilustración 9. Sistema de Alumbrado Simétrico	26
Ilustración 10. Sistema de Alumbrado a Contraflujo.....	27
Ilustración 11. Perturbación de la Visión debido a las Iluminancias de Velo.....	30
Ilustración 12. Representación de la Luminancia	33
Ilustración 13. Luminancímetro Mavo-Spot 2 USB	34
Ilustración 14. Campo de Visión Cónico de 20° a una Distancia Dp	37
Ilustración 15. Vista en perspectiva de la entrada de un túnel con el círculo correspondiente al ángulo de visión de 20°	37
Ilustración 16. Luminancia de la Zona de Acceso L20 para Situaciones Típicas de Túneles	40
Ilustración 17. Campo de Visión Cónico de 20° del Túnel Cerro Santa Ana.....	49
Ilustración 18. Campo de Visión Cónico de 20° del Túnel Cerro El Carmen	50
Ilustración 19. Campo de Visión Cónico de 20° del Túnel San Eduardo Dirección Norte.....	52
Ilustración 20. Campo de Visión Cónico de 20° del Túnel San Eduardo Dirección Sur	53

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

1.1. JUSTIFICACIÓN

-Debido a la topografía muy variable, y al rápido desarrollo ha sufrido el Ecuador en cuestión de comunicación terrestre, se ha tenido la necesidad de construir varios túneles a lo largo de su red vial.

-La Normativa NEVI 12 es la Normativa Ecuatoriana actual para Infraestructura vial, esta nos da las pautas para los diferentes procedimientos y guías a seguir al momento de realizar diseño, operación y mantenimiento de la infraestructura vial del país, pero esta carece de normativas específicas destinadas a este tipo de obras civiles como son los túneles. Dentro de nuestro tema de disertación se realizará una evaluación de la iluminación a cuatro túneles ubicados en la ciudad de Guayaquil, la principal arteria vial urbana de nuestro país, basándose en la Normativa Técnica de Carreteras de España “Orden Circular 36/2015”, vigente para iluminación en túneles, y de esta manera comprobar si estos están brindando la debida seguridad y confort que los usuarios necesitan.

-Basándose en los resultados obtenidos al final de esta disertación, en un futuro podría plantearse la creación de una normativa ecuatoriana específica sobre diseño de iluminación de túneles, basándose en las condiciones propias del país.

1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Muchas de las vías dentro del país debido a la topografía del mismo, tienen tramos que necesitan de la construcción de túneles, y estos al ser una construcción cerrada, requieren una mayor cantidad de parámetros de seguridad debido a los varios accidentes y emergencias que se puedan dar dentro de ellos, debido a esto uno de los parámetros más importantes es una correcta iluminación dentro de este tipo de obras civiles.

Al ser una estructura que carece de iluminación exterior, esta requiere una iluminación artificial durante todas las horas del día. Pero esta debe cumplir ciertas características y parámetros descritas por normativas para poder brindar seguridad y confort al usuario. Por

lo cual es necesario realizar una evaluación de la situación actual de la misma, para ver si cumple o no con los criterios de diseño de normativas vigentes.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivos Generales

Realizar una evaluación del diseño de la iluminación de los túneles más representativos del país, basándose en la Normativa Técnica de Carreteras de España “Orden Circular 36/2015.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Conocer el estado actual de luminancia de los túneles del Cerro Santa Ana, Cerro El Carmen, y San Eduardo dirección Norte y Sur ubicados en la ciudad de Guayaquil.
- Verificar si la luminancia actual de los diferentes túneles evaluados cumple con las normativas españolas vigentes.
- Identificar las fallas en el diseño de iluminación de los túneles analizados y conocer si es necesario realizar una intervención en la calidad y diseño de la iluminación de estos.
- Describir los resultados obtenidos en la evaluación, y con esta información tener un punto de partida para poder realizar una intervención o un rediseño en el sistema de iluminación de los túneles en el caso que sea necesario.

1.4. ALCANCE

El alcance de esta disertación será de manera descriptiva y de campo, ya que lo que busca es realizar una medición de las condiciones de iluminación, es decir obtener información del nivel actual de luminancia dentro de los túneles del Cerro Santa Ana, Cerro El Carmen, y San Eduardo dirección Norte y dirección Sur; basándonos en Normativa Técnica de Carreteras de España “Orden Circular 36/2015.

Ya que en el Ecuador no existe una norma que especifique a detalle las diferentes técnicas, procesos constructivos, de instalación, y de control. De esta manera se podrá tener un control de calidad en el diseño de luminancia, y verificar si es que estos túneles brindan la adecuada seguridad y confort, o necesitan de algún tipo de intervención.

1.5. ANTECEDENTES

La construcción de los túneles Cerro Santa Ana, Cerro El Carmen, y los túneles del Cerro San Eduardo son proyectos emblemáticos y muy importantes de la ciudad de Guayaquil, que junto a los Puentes de la Unidad Nacional conforman una mejora considerable al Sistema Vial y urbano de la urbe, recortando notablemente tiempos de viaje y permitiendo que exista una integración entre distintas zonas clave de la ciudad.

Los túneles que van a ser evaluados dentro de esta disertación se encuentran en la región Costa de Ecuador, en la provincia del Guayas, ciudad de Guayaquil.

1.3.3. TUNEL CERRO SANTA ANA



Fotografía 1. Túnel Cerro Santa Ana

Fuente: (Google Maps, 2015)

- **Ubicación:** Centro-Norte de la Ciudad de Guayaquil
- **Dirección de Circulación:** Sentido Sur-Norte
- **Año de Inauguración:** 2002
- **Longitud:** 540 m
- **Número de Carriles:** 3
- **Ancho de Carriles:** 3.25 m
- **Ancho de Calzada Pavimentada:** 10.15 m
- **Altura de la Boca de Entrada:** 5.0 m
- **Tipo de Pavimento:** Pavimento Rígido (Hormigón)
- **Altitud de la Zona de Acceso:** 10 msnm
- **Orientación de la Boca de Entrada:** Dirección Sur
- **Coordenadas GPS:** Ingreso: -2.183290636168; -79.87652678028
Salida: -2.178742224818; -79.87839091555

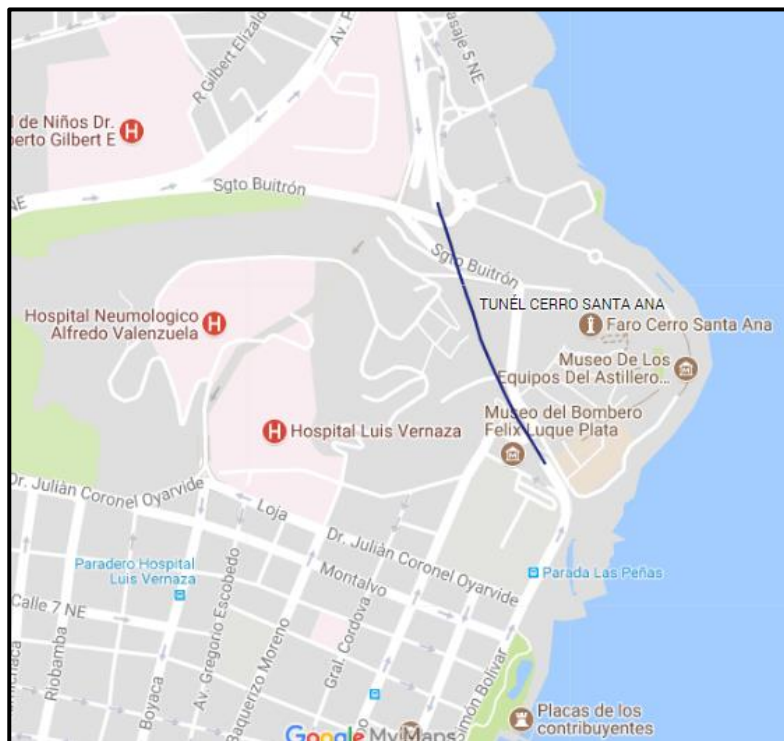


Ilustración 1. Túnel Cerro Santa Ana

Fuente: (Google Maps, s.f.)

1.3.4. TUNEL CERRO EL CARMEN



Fotografía 2. Túnel Cerro El Carmen

Fuente: (Google Maps, 2015)

- **Ubicación:** Centro-Norte de la Ciudad de Guayaquil
- **Dirección de Circulación:** Sentido Norte-Sur
- **Longitud:** 745 m
- **Año de Inauguración:** 2003
- **Número de Carriles:** 3
- **Ancho de Carriles:** 3.38 m
- **Ancho de Calzada Pavimentada:** 10.55 m
- **Altura de la Boca de Entrada:** 7.0 m
- **Tipo de Pavimento:** Pavimento Rígido (Hormigón)
- **Altitud de la Zona de Acceso:** 10 msnm
- **Orientación de la Boca de Entrada:** Dirección Norte
- **Coordenadas GPS:** Ingreso: -2.1784661569810; -79.87872887388
Salida: -2.1835372202446; -79.88233912722



Ilustración 2. Túnel Cerro El Carmen

Fuente: (Google Maps, s.f.)

1.3.5. TUNELES SAN EDUARDO



Fotografía 3. Túnel San Eduardo (Dirección Norte)

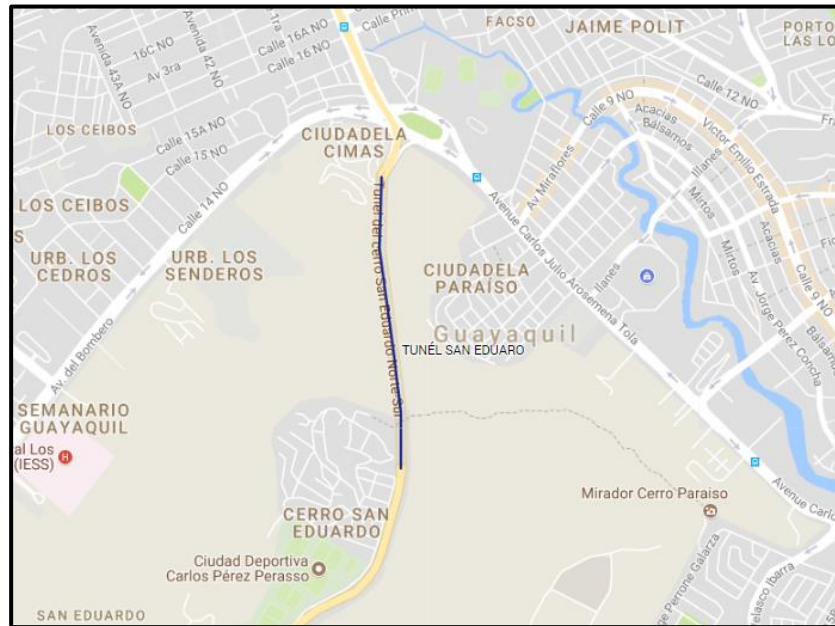
Fuente: (Google Maps, 2015)



Fotografía 4. Túnel San Eduardo (Dirección Sur)

Fuente: (Google Maps, 2015)

- **Ubicación:** Noroeste de la Ciudad de Guayaquil
- **Dirección de Circulación:** Sentido Norte-Sur y Sentido Sur-Norte
(1 túnel cada sentido)
- **Longitud:** 1295 m
- **Año de Inauguración:** 2008
- **Número de Carriles:** 3 por túnel
- **Ancho de Carriles:** 3.25 m
- **Ancho de Calzada Pavimentada:** 10.15 m
- **Altura de la Boca de Entrada:** 7.0 m
- **Tipo de Pavimento:** Pavimento Rígido (Hormigón)
- **Altitud de la Zona de Acceso:**
 - Cara Dirección Sur: 18 msnm
 - Cara Dirección Norte: 88 msnm
- **Orientación de la Bocas de Entradas:** Dirección Norte y Dirección Sur
- **Coordenadas GPS:**
 - Cara Dirección Sur: -2.1639143241489; -79.92668020000
 - Cara Dirección Norte: -2.1769131427381; -79.92654149259



Ilustración 3. Túnel San Eduardo

Fuente: (Google Maps, s.f.)

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

2.1. MARCO TEÓRICO

Los túneles comenzaron a construirse muchos años atrás cuando empezó a aparecer la minería, y para poder satisfacer la necesidad de suministro y distribución de agua en varios lugares del mundo, con el paso del tiempo y gracias a la evolución de la tecnología se ha encontrado un mayor número de utilidades para estos como son para vías ferroviarias, transporte subterráneo como metros, transporte y distribución de redes de servicio público como redes telefónicas, de servicio eléctrico, entre otras, y de los más importantes y utilizados actualmente, para la circulación de vehículos, es decir el sistema vial, que cada vez tiene mayor exigencia y demanda en nuestro medio. (Thompson, 1998)

Los túneles son obras subterráneas que nos permiten atravesar obstáculos geográficos, como son las montañas, y con esto lograr reducir las distancias de viaje, y costos de operación significativamente. Gracias a los nuevos métodos y tecnologías que se han desarrollado, hoy en día existe la posibilidad de atravesar largas distancias, y perforar cualquier tipo de estrato sea suelo o roca sin importar sus características mecánicas.

Estas infraestructuras todavía tienen connotaciones negativas para los ciudadanos, ya que por lo general solo aparecen en los medios de comunicación cuando han existido accidentes, o cualquier clase de catástrofe que involucre la pérdida de vidas humanas. La tecnología actual nos permite construir estas obras en todo tipo de geología que podamos encontrar. Entonces al ser cuidadosos desde su correcto diseño, hasta su construcción y operación, nos permitirán reducir todas estas perspectivas negativas. (Llopis Serrano, 2013)

Los túneles dentro del trazado de una carretera deben brindar la misma seguridad y confort que brinda la vía de la cual estos son parte, por lo que se deben tener en cuenta muchas consideraciones con respecto a estos temas, ya que, al ser un espacio cerrado, la probabilidad de accidentes y emergencias que se puedan dar dentro de estos aumenta considerablemente.

Debido a que los túneles son obras subterráneas, estas carecen de iluminación natural, por lo que uno de los parámetros más importantes a tomarse en cuenta el momento de diseñar un túnel es la iluminación dentro del mismo, tanto en la noche como en el día, para poder

mantener las condiciones de seguridad y confort de la carretera a lo largo de todo su recorrido.

La iluminación del túnel durante el día es la que mayor cantidad de problemas tiene, debido a que resulta impráctico tanto técnico, como económicamente, debido a que este debe tener la misma iluminación en el interior, así como sea la iluminación exterior de la vía. En días muy soleados, la iluminación exterior podría llegar significativamente mayor que la del interior del túnel, lo que produce un gran esfuerzo para la vista de los conductores, ya que el ojo humano no tiene la capacidad de adaptarse a cambios bruscos de luz, lo que hace que se reduzcan considerablemente los tiempos de reacción del conductor, pudiendo provocar accidentes.

Al ojo humano le resulta más complicado y le toma mayor cantidad de tiempo poderse adaptar de algo claro a algo oscuro, que de algo oscuro a algo claro. Además, ya que los conductores se encuentran en desplazamiento continuo, el sistema óptico no se encuentra estable. Esto crea un problema de transición, además de los problemas por destellos de luz debido a la separación que se encuentran ubicadas las luminarias, debido a esto resulta muy complicado aplicar soluciones sencillas.

2.2. TÚNELES

2.2.1. DEFINICIÓN DE TÚNEL

La definición de túnel varía entre diferentes autores, así como entre diferentes lugares del mundo.

-Un túnel se lo define como una obra civil, generalmente un camino subterráneo, cavado a través de suelo o roca, y encerrado a excepción de la entrada y salida. Un túnel puede para tráfico vehicular, de ferrocarriles o para canales de agua. Esta excavación se la puede hacer por diferentes métodos, desde los tradicionales, hasta los más modernos utilizando “tuneladoras”. (Bickel, 1982)

-En el Reino Unido, un túnel se define como: “Estructura de carretera subsuperficial encerrada con una longitud de 150 metros, o más”. (The Department for Transport, 1999)

- En los Estados Unidos, un túnel se define como: “Estructura subterránea con una longitud de diseño mayor a 23 metros, y un diámetro mayor que 1.80 metros”. (National Fire Protection Association)

2.2.2. HISTORIA DE LOS TÚNELES

Han sido muy pocos los periodos de la historia donde los túneles no hayan sido utilizados de alguna manera. Cuando las personas comenzaron a vivir en las ciudades de los países Mediterráneos del Este, uno de los problemas más urgentes era el de llevar agua a estos lugares, generalmente de zonas lejanos. Durante siglos, comenzando con los asirios alrededor del 1200 A.C, hasta los decadentes años del Imperio Romano, los túneles han sido construidos como parte de un sistema elaborado de acueductos. Con el fin de reducir las pérdidas por evaporación, los antiguos persas construyeron miles de acueductos, excavando entre pozos ligeramente separados, muchos de los cuales siguen en uso. (Bickel J. , 1982)

La era moderna de los túneles comenzó con la construcción de vías ferroviarias, particularmente en la parte Oeste de los Estados Unidos. La era automotriz, con su rápida aceleración de desarrollo de autopistas, trajo un nuevo auge en la construcción de túneles, donde la ventilación e iluminación era un nuevo problema. Paralelamente a esto, existió un crecimiento de la ciudad en regiones con poca agua, lo que aumento la construcción de acueductos con túneles largos, abasteciendo agua desde lugares con abundante precipitación. La tendencia de ubicar grandes arterias de tráfico dentro y alrededor de las ciudades, y la necesidad de sistemas de circulación vehicular cada vez más rápidos en zonas urbanas se tornaron en un crecimiento continuo de la construcción de túneles a futuro, acompañado de la búsqueda de métodos cada vez más eficientes. (Bickel, 1982).

TÚNELES MAS LARGOS DEL MUNDO

- TÚNEL DE CARRETERA MÁS LARGO

Nombre: Túnel de Laerdal

Longitud: 24,51 kilómetros

Tipo de Túnel: Vehicular

Ubicación: Laerdal – Aurland (Noruega)

Año de Finalización: 2000

Este túnel permite la conexión entre 2 de las ciudades más grandes de Noruega. Una de sus principales funciones es el tener una ruta que permita el tránsito vehicular durante el invierno, que debido a su inclemente clima hace imposible el tránsito durante estas épocas. Tardo 5 años en ser construido, fue perforado en roca sólida. Para su ventilación utiliza 2 ventiladores gigantes, y un filtro electrostático. (CANALVIAJES, 2012)

- TÚNEL DE FERROCARRIL MÁS LARGO

Nombre: Túnel de base de San Gotardo

Longitud: 57,1 kilómetros

Tipo de Túnel: Ferrocarril

Ubicación: Alpes Lepontinos (Suiza)

Año de Finalización: 2016

Este túnel de ferrocarril conecta de una manera rápida y eficiente al Norte y al Sur de Europa, alcanzando velocidades de hasta 250 km/h. Tardo alrededor de 17 años en ser construido, y más de 28 millones de toneladas de roca y escombros fueron removidos. (BBC Mundo, 2016)

- TÚNEL DE AGUA MÁS LARGO

Nombre: Acueducto de Delaware

Longitud: 137 kilómetros

Tipo de Túnel: Abastecimiento de agua

Ubicación: New York (Estados Unidos)

Año de Finalización: 1945

Este túnel de 4,1 metros de ancho es la principal vía de suministro de agua de New York, transportando alrededor de 5 millones de metros cúbicos al día. Tardo cerca de 6 años en ser construido, hoy en día está en proceso de reparación para controlar las pérdidas de agua debido a la infiltración. (Retos de la Ingeniería Civil, 2014)

2.2.3. DISEÑO DE TUNELES

La planificación para la construcción de un túnel de carretera requiere una diversa participación y diferentes tipos de estudios, y por lo general utiliza los mismos requisitos que para carreteras y puentes. Ciertas consideraciones, como iluminación, ventilación, seguridad, operación y mantenimiento, deben ser enfocadas específicamente para túneles. Todos estos diseños y consideraciones deben tomar en cuenta la vida útil del túnel, el cual es significativamente mayor al de otras estructuras viales como son las carreteras y los puentes. (Federal Highway Administration, 2009)

SECCIÓN TRANSVERSAL DEL TUNEL

La geometría de la sección transversal del túnel debe satisfacer el número de carriles necesarios, las bermas o carriles de seguridad, espacios necesarios para iluminación, ventilación, sistemas de control de tráfico, sistemas de seguridad contra fuego, etc. La geometría de esta sección depende del método utilizado para la construcción del túnel, y del tipo de suelo en el que se trabaja.

-Túnel Rectangular

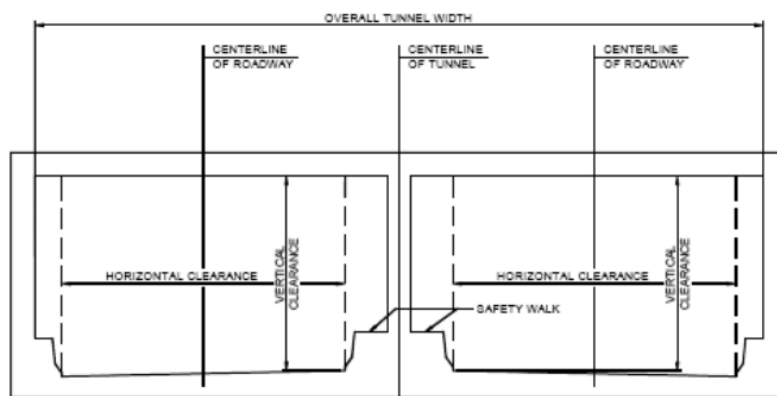


Ilustración 4. Sección Transversal de Túnel Rectangular

Fuente: (Federal Highway Administration, 2009)

-Túnel Circular

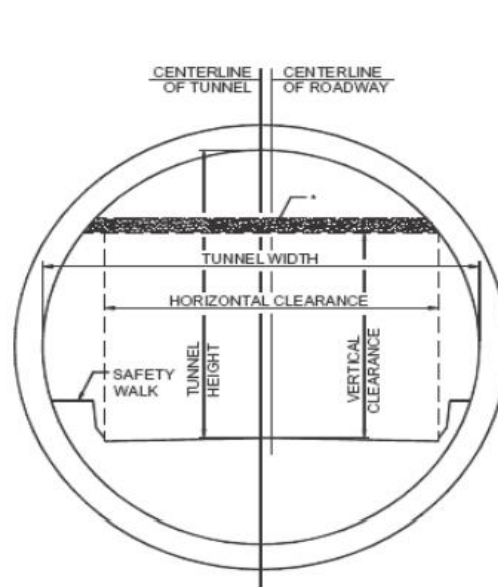


Ilustración 5. Sección Transversal de Túnel Circular

Fuente: (Federal Highway Administration, 2009)

-Túnel de Herradura

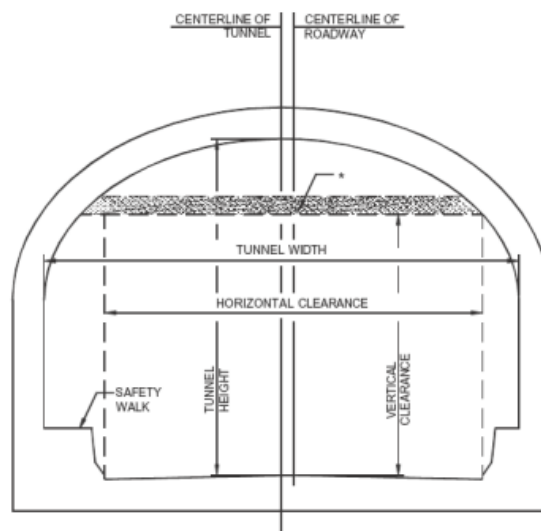


Ilustración 6. Sección Transversal de Túnel de Herradura

Fuente: (Federal Highway Administration, 2009)

ELEMENTOS TÍPICOS DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL

La sección transversal de un túnel debe ser capaz de poder satisfacer las distancias tanto verticales como horizontales del diseño, así como todos los elementos requeridos para la correcta operación del mismo. Los elementos más importantes de la sección transversal son:

- Carriles de Tráfico
- Bermas u hombreras
- Aceras
- Sistema de Drenaje
- Sistema de Ventilación
- Sistema de Iluminación
- Conductos de Energía Eléctrica
- Tuberías de Agua para Incendios

(Federal Highway Administration, 2009)

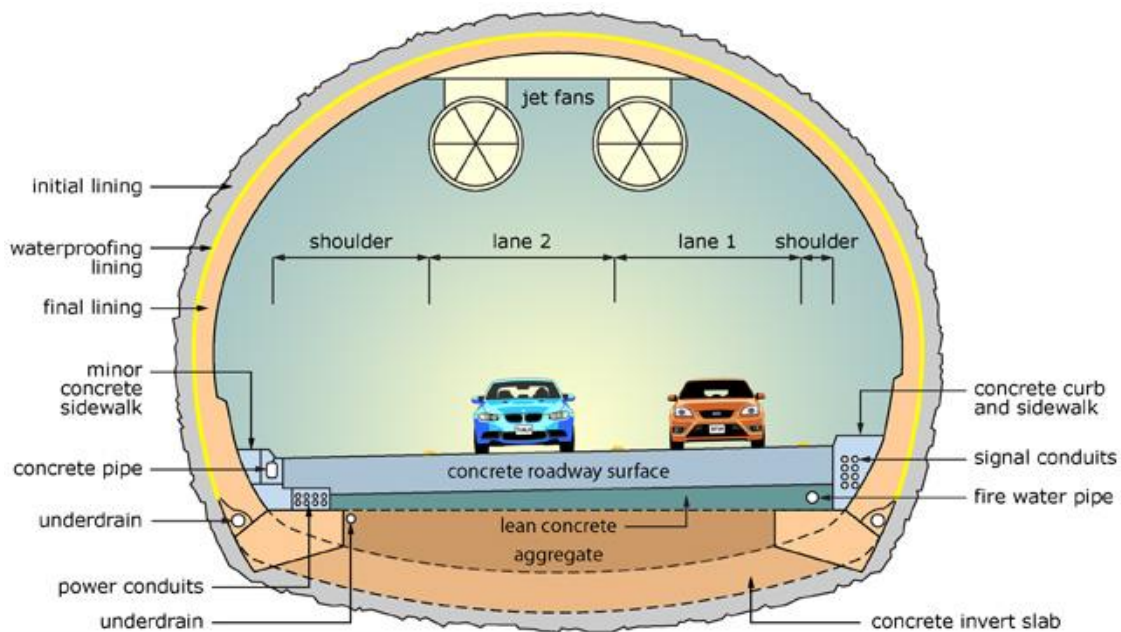


Ilustración 7. Elementos de Sección Transversal del Túnel

Fuente: (Risdén) Recuperado de:
<http://www.ucmp.berkeley.edu/exhibits/caltrans/fourthbore2.php>

2.3. ILUMINACIÓN EN TÚNELES

Debido a las características de los túneles, para que estos puedan garantizar una correcta operación ya sea en condiciones normales de circulación o en condiciones de emergencia, y brindar la adecuada seguridad y confort para los usuarios, estos deben contar con instalaciones de seguridad como son los sistemas de iluminación, de ventilación, de emergencia, entre otros.

La iluminación en túneles ayuda a los conductores a identificar peligros o vehículos descompuestos dentro del túnel, con una distancia suficiente para poder reaccionar adecuadamente o detenerse. (Federal Highway Administration, 2009)

Ya que este tipo de obras se encuentran siempre en continuo funcionamiento, para poder mantener el nivel de servicio apropiado deben contar con un correcto mantenimiento, por lo que es necesario que periódicamente se realicen inspecciones de todas las instalaciones y equipos del túnel para de esta forma poder mantener las condiciones de operación adecuadas. (Llopis Serrano, 2013)

2.3.1. CARACTERÍSTICAS Y REQUISITOS DE ILUMINACIÓN EN TÚNELES

La iluminación en túneles, específicamente en horas del día, presenta varios problemas. Esto es debido a lo impráctico que se vuelve tanto técnico como económicamente, iluminar un túnel de la misma manera que esta una carretera a cielo abierto. En días soleados existe una gran diferencia, en relación de 100 a 1, entre la iluminación exterior y la iluminación interior, y esto se convierte en un gran inconveniente visual para los conductores debido a la dificultad del ojo humano para adaptarse a cambios bruscos de luz. Al ojo humano le toma mayor cantidad de tiempo poder adaptarse de claro a oscuro que de oscuro a claro. Ya que el conductor se encuentra en circulación, su sistema óptico no se encuentra estable. Esto crea un problema de transición, además de otros problemas como el parpadeo de las fuentes de luz debido al espaciamiento, en donde las soluciones para iluminación interior no son muy sencillas de aplicar. (Thompson, 1998)

PARÁMETROS DE DISEÑO DE ILUMINACIÓN

Los parámetros más importantes que tomar en cuenta el momento de diseñar el sistema de iluminación de un túnel son la velocidad de circulación del proyecto, la intensidad de tráfico que va a transitar por el este, y la composición del tráfico.

Existe una importante relación entre la intensidad de tráfico, la velocidad de circulación, y el riesgo de accidente dentro de una carretera, a mayores intensidades de tráfico, y a más altas velocidades de circulación existe un mayor riesgo de accidentes. Este riesgo puede ser disminuido al tener un mayor nivel de luminancia dentro del túnel. (Ministerio de Fomento de España, 2015)

Velocidades de Circulación en Ecuador

De acuerdo con el “Reglamento A Ley De Transporte Terrestre Transito Y Seguridad Vial”, artículo 191, los límites máximos de velocidad vehicular permitidos en las vías públicas son:

- Vehículos Livianos:

Urbana: 50 Km/h

Perimetral: 90 Km/h

Rectas: 100 Km/h

- Vehículos Pesados y de Transporte Publico:

Urbana: 40 Km/h

Perimetral: 70 Km/h

Rectas: 90 Km/h

(ANT, 2012)

- Los túneles evaluados dentro de esta disertación se encuentran dentro del perímetro urbano, por lo que su velocidad máxima de circulación es de 50 Km/h.

Tabla 1. Velocidades de Circulación en Túneles Evaluados

TÚNELES	Zona de Ubicación	Velocidad Max. Circulación (Km/h)
Cerro Santa Ana	Zona Urbana	50
Cerro El Carmen	Zona Urbana	50
San Eduardo Dirección NORTE	Zona Urbana	50
San Eduardo Dirección SUR	Zona Urbana	50

Fuente: Elaboración Propia

REQUISITOS PARA LA ILUMINACIÓN

Los principales requisitos que debe cumplir la iluminación especialmente en la entrada del túnel son:

- Evitar el efecto de agujero negro que sucede cuando el conductor es incapaz de ver dentro del túnel.
- Reducir la probabilidad de un choque dentro del túnel, sea con un vehículo motorizado o no.
- Permitir reaccionar al conductor y que este pueda detenerse dentro de la distancia de parada, por cualquier amenaza inesperada dentro del túnel.

(Ministerio de Fomento de España, 2015)

2.3.2. ASPECTOS QUE TOMAR EN CUENTA PARA EL DISEÑO DE LA ILUMINACIÓN

Debido al cambio drásticos del espacio al ingresar a un túnel, la percepción del conductor se puede ver alterada, presentando varios inconvenientes, especialmente en las capacidades visuales reduciéndolas considerablemente. Las capacidades que mayormente se ven afectadas son la percepción de contraste y colores, la visión periférica, y la discriminación de colores. También se debe tomar en cuenta que

algunos conductores podrían verse afectados por trastornos psicológicos como la claustrofobia.

Las siguientes recomendaciones nos ayudan a mantener una percepción completa del usuario al momento de transitar a través de un túnel.

Antes de entrar al Túnel:

- El trazado vial debe mostrar claramente que existe un túnel a continuación, mediante el uso de señales de tránsito.
- Los portales de entrada deben estar contruidos con materiales oscuros, a fin de reducir la luminancia de la zona de acceso
- La carretera debe presentar una superficie muy oscura hasta la boca del túnel.

Al entrar al Túnel:

- Las orientaciones Este-Oeste pueden causar más problemas que las orientaciones Norte-Sur.
- Evitar superficies de color claro en los alrededores inmediatos del portal, como edificaciones, o muros.
- Utilizar árboles obras de ingeniería para evitar el deslumbramiento directo producido por el sol.

Dentro del Túnel:

- Adoptar una superficie de calzada de color claro, que debería ser casi difusa para el alumbrado simétrico, y más especular para el alumbrado a contraflujo.
- Mantener un buen guiado visual a lo largo de la carretera.
- Utilizar señalización luminosa cuando el túnel está alumbrado por fuentes de luz monocromáticas.

Al salir del Túnel:

- Cuando pueda existir deslumbramiento producido por el sol a la salida del túnel, utilizar arboles u obras de ingeniería para apantallar la luz solar directa.

(Ministerio de Fomento de España, 2015)

2.3.3. ZONAS DE ILUMINACIÓN DEL TUNEL

Los túneles de carretera están divididos en varias zonas considerando su iluminación. Dependiendo de las distancias que estas zonas tengan desde la entrada o salida del túnel, tendrán diferentes requerimientos de, y luminancia L .

Las zonas del túnel son las siguientes:

Zona de Acceso (L_{20}): Es la parte a cielo abierto de la carretera, que se encuentra en la entrada de la boca del túnel, abarca la distancia a la que el conductor debe ser capaz de ver en el interior del túnel. Tiene una longitud igual a la distancia de parada medida desde la boca del túnel, hasta un punto fuera del mismo. Tiene una longitud mínima igual a la distancia de parada. (Ministerio de Fomento de España, 2015)

Zona de Umbral (L_{th}): Esta es la primera parte del interior del túnel que viene directamente después del portal. Inicia en la boca del túnel, y su longitud es igual a la distancia de parada. (Ministerio de Fomento de España, 2015)

Zona de Transición (L_{tr}): Es la parte del túnel que viene después de la zona de umbral. Inicia al final de la zona de umbral y termina al inicio de la zona interior. En esta zona el nivel de iluminancia disminuye progresivamente desde el nivel al final de la zona de umbral hasta el nivel de la zona interior. (Ministerio de Fomento de España, 2015)

Zona Interior (L_{in}): Es a parte del túnel que viene directamente después de la zona de transición. Inicia al final de la zona de transición y termina al comienzo de la zona de salida. (Ministerio de Fomento de España, 2015)

Zona de Salida (L_{ex}): Es la zona al final del túnel. Inicia al final de la zona interior y termina en el portal de salida del túnel. Durante el día, esta parte del túnel está influida predominantemente por la elevada iluminación exterior del túnel. Tiene una longitud mínima igual a la distancia de parada. (Ministerio de Fomento de España, 2015)

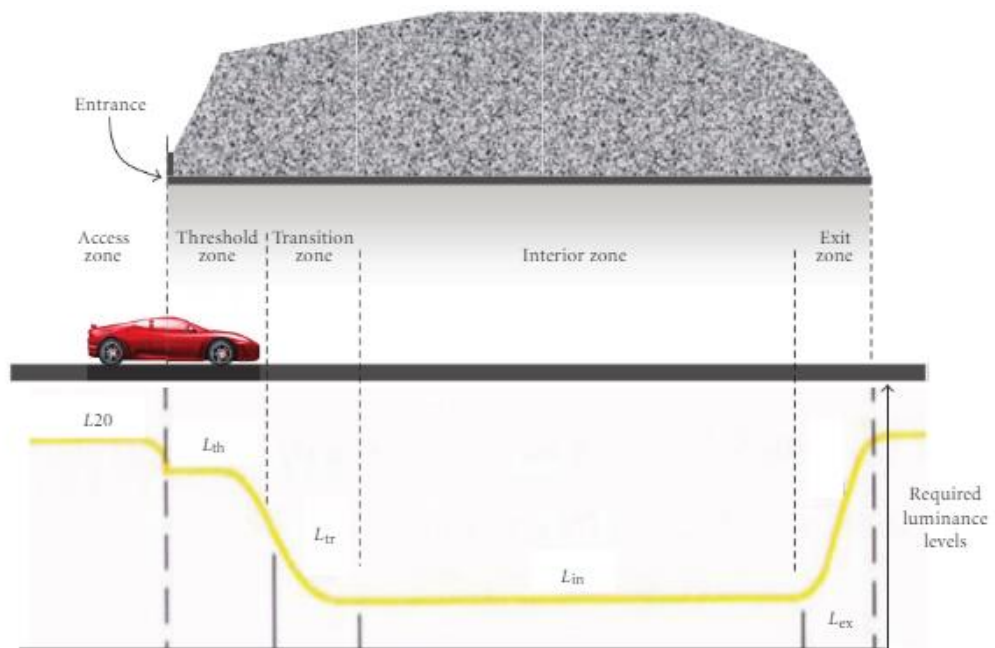


Ilustración 8. Zonas del Túnel y Valores de Luminancia

Fuente: (Peña-Garcia, Gil-Martin, Escribano, & Espín-Estrella, 2011)

2.3.4. CLASIFICACIÓN DE LOS TÚNELES

Los túneles se pueden clasificar de varias formas, pero las más importantes y las que vamos a tomar en cuenta para conocer el tipo de iluminación a utilizar y si es que esta es necesaria son: de acuerdo con las características físicas y de uso; y respecto a su longitud.

2.3.3.1. CLASIFICACIÓN DE ACUERDO CON SU LONGITUD

Para clasificar los túneles de acuerdo con su longitud, nos basamos en la capacidad que tiene el usuario de ver a través de ellos, basándonos en cómo se ve desde un punto ubicado antes de ingresar a la boca del túnel, a una distancia igual a la distancia de parada. Estos pueden ser túneles largos o túneles cortos. Los requisitos de iluminación varían dependiendo del tipo de túnel con el que estamos trabajando. (Ministerio de Fomento de España, 2015)

TÚNELES CORTOS

Su longitud es menor a los 200 metros. Estos túneles existen generalmente cuando una vía pasa por debajo de otra carretera o vía férrea, por lo general esto se da en condiciones urbanas. Los túneles con longitudes menores a 25 metros generalmente no necesitan iluminación artificial diurna; mientras que los túneles con longitudes entre 25 y 200 metros requieren de un estudio de su necesidad de iluminación. (Ministerio de Fomento de España, 2015)

TÚNELES LARGOS

Su longitud generalmente es mayor a 200 metros. Este tipo de túnel necesita obligatoriamente iluminación artificial diurna para evitar cualquier tipo de problemas de adaptación del usuario al ingresar a estos. (Ministerio de Fomento de España, 2015)

- Los túneles evaluados dentro de esta disertación debido a que tienen longitudes mayores a los 200 m, los podemos clasificar como Túneles Largos.

Tabla 2. Clasificación de Túneles Evaluados según su Longitud

TÚNELES	Longitud (m)	Tipo de Túnel
Cerro Santa Ana	540	TÚNEL LARGO
Cerro El Carmen	745	TÚNEL LARGO
San Eduardo Dirección NORTE	1295	TÚNEL LARGO
San Eduardo Dirección SUR	1295	TÚNEL LARGO

Fuente: Elaboración Propia

2.3.3.2. CLASIFICACIÓN DE ACUERDO CON LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y USO

En función de sus características físicas y de uso, los túneles se pueden clasificar de la siguiente forma:

- Intensidad de Tráfico
- Tipo y composición del tráfico
- Guiado Visual

(Ministerio de Fomento de España, 2015)

INTENSIDAD DE TRÁFICO

Para la intensidad de tráfico se consideran como hora punta la IH100. La IH100 representa la intensidad horaria de vehículos que solo es superada por 100 horas al año. Según esta intensidad, podemos clasificar a los túneles en los siguientes niveles:

Tabla 3. Intensidad de Tráfico de la hora punta

Intensidad de tráfico	Tráfico unidireccional (vehículos/hora·carril)	Tráfico bidireccional (vehículos/hora·carril)
Alta	>1.500	>700
Media	500-1500	200-700
Baja	<500	<200

Fuente: (Ministerio de Fomento de España, 2015, pág. 13)

- Después de analizar los volúmenes de tráfico de las vías de ingreso a los túneles evaluados, se obtuvo los datos de IH100. Y Debido a que los túneles evaluados en esta disertación tienen todos valores de tráfico hora por carril mayores a 1500, se clasifica su nivel de intensidad como Alta.

Tabla 4. Clasificación de los Túneles Evaluados según la Intensidad de Tráfico

TÚNELES	IH100	Número de Carriles	Tráfico (vehículos/hora * carril)	Intensidad de Tráfico
Cerro Santa Ana	4515	3	1505	Alta
Cerro El Carmen	4557	3	1519	Alta
San Eduardo Dirección NORTE	5020	3	1673	Alta
San Eduardo Dirección SUR	4945	3	1648	Alta

Fuente: Elaboración Propia

COMPOSICION DE TRAFICO

La composición del tráfico dentro del túnel es importante, ya que la iluminación en este debe ser capaz de adaptarse a todo tipo de circunstancias. Se debe considerar mucho los factores como: porcentaje de vehículos pesados, presencia de bicicletas, peatones, o de la posibilidad de transitar elementos de características peligrosas. (Ministerio de Fomento de España, 2015)

Dependiendo de la composición de tráfico puede ser:

- A: Solo tráfico motorizado.
- M: Tráfico mixto incluyendo bicicletas.

→ En los túneles evaluados dentro de esta disertación no se permite el tráfico de bicicletas ni de peatones, por lo tanto, se los clasifica como Solo Tráfico Motorizado (Tipo A)

Tabla 5. Clasificación de los Túneles Evaluados según la Composición del Tráfico

TÚNELES	Composición del Tráfico	Tipo de Tráfico
Cerro Santa Ana	Solo motorizado	A
Cerro El Carmen	Solo motorizado	A
San Eduardo Dirección NORTE	Solo motorizado	A
San Eduardo Dirección SUR	Solo motorizado	A

Fuente: Elaboración Propia

GUIADO VISUAL

El guiado visual es un sistema que facilita la conducción en los túneles, incrementando la visibilidad de la calzada, de la señalización vertical y sobre todo la horizontal.

Este guiado visual se considera solo para túneles con intensidad de tráfico baja ($IMD < 500$) y tipo A, ya que en este caso no se justifica el alumbrado de túnel “completo”. (Ministerio de Fomento de España, 2015)

→ Debido a que los túneles evaluados dentro de esta disertación tienen IMD mayores a 500, estos necesitan obligatoriamente iluminación artificial.

Tabla 6. Tipo de Alumbrado Requerido en los Túneles Evaluados

TÚNELES	IMD	Tipo de Alumbrado
Cerro Santa Ana	58904	Alumbrado Artificial
Cerro El Carmen	57748	Alumbrado Artificial
San Eduardo Dirección NORTE	64502	Alumbrado Artificial
San Eduardo Dirección SUR	64221	Alumbrado Artificial

Fuente: Elaboración Propia

- En función de la intensidad y del tipo de tráfico, se establecen 4 clases de alumbrado para túneles, que se muestran a continuación.

Tabla 7. Clase de Alumbrado de Túneles

Intensidad de tráfico	Alta		Media		Baja	
Tipo de tráfico	M	A	M	A	M	A
Clase de túnel	4	3	3	2	2	1 (guiado)

Fuente: (Ministerio de Fomento de España, 2015, pág. 13)

- Basándonos en la “*Tabla 7*” podemos clasificar a los túneles evaluados en esta disertación de la siguiente manera.

Tabla 8. Clase de Alumbrado en Túneles Evaluados

TÚNELES	Intensidad de Tráfico	Tipo de Tráfico	Clase de Túnel
Cerro Santa Ana	Alta	A	3
Cerro El Carmen	Alta	A	3
San Eduardo Dirección NORTE	Alta	A	3
San Eduardo Dirección SUR	Alta	A	3

Fuente: Elaboración Propia

2.3.5. SISTEMAS DE ALUMBRADO ARTIFICIAL

Debido a que los túneles carecen de iluminación natural debido a sus características propias, para poder brindar la misma seguridad y confort que tiene la carretera a cielo abierto, es necesario iluminarlos de forma artificial.

Los 2 sistemas de iluminación artificial que más usados son: sistema de alumbrado simétrico, y el sistema de alumbrado a contraflujo. Estos se refieren a la distribución de la intensidad luminosa de las luminarias que son utilizadas para la iluminación. (Ministerio de Fomento de España, 2015)

SISTEMA SIMÉTRICO

Es el sistema en el cual las luminarias poseen una distribución de intensidad luminosa que es simétrica en relación con el plano normal a la dirección del tráfico, es decir, la luz incide igualmente sobre los objetos en dirección a favor y en contra del tráfico. (Ministerio de Fomento de España, 2015)

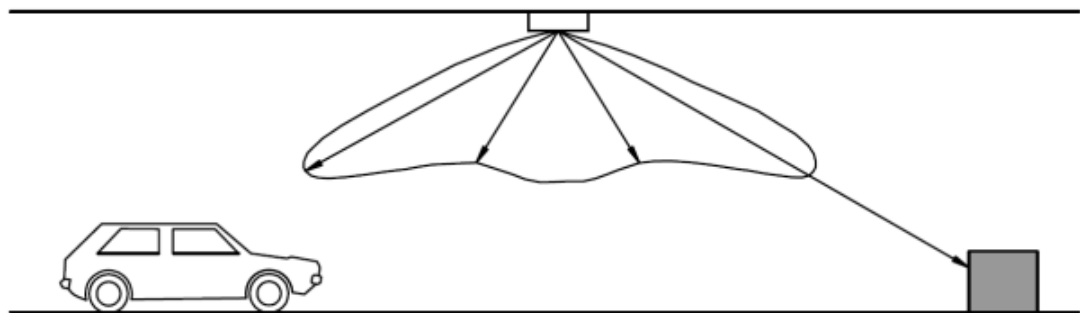


Ilustración 9. Sistema de Alumbrado Simétrico

Fuente (Ministerio de Fomento de España, 2015, pág. 9)

SISTEMA A CONTRAFLUJO

En este sistema se aplican luminarias en las cuales su intensidad luminosa máxima está dirigida en contra del sentido del tráfico, y poseen una baja intensidad luminosa en el mismo sentido del tráfico, de modo que la distribución de intensidad luminosa es altamente asimétrica. Normalmente este sistema de iluminación produce un contraste negativo más elevado para objetos sobre la carretera, debido a que la iluminancia en los planos que están enfrente de los conductores que se p (Ministerio de Fomento de España, 2015)

Al usar superficies especulares de calzada, usualmente el rendimiento de luminancia es mucho mayor a comparación del alumbrado simétrico. Este alumbrado generalmente creara un mayor contraste entre los objetos y el fondo (por ejemplo, entre la calzada y las paredes del túnel). (Ministerio de Fomento de España, 2015)

Desventajas del sistema de alumbrado a contraflujo:

- Posibilidad de producir un incremento en el efecto agujero negro, debido a que la iluminación en la zona de umbral puede ser reducida.
- Poco efectivo en túneles con altas intensidades de tráfico
- Poco efectivo para túneles con elevado porcentaje de vehículos pesados.
- No es apropiado para túneles con alta penetración de luz natural en su entrada.

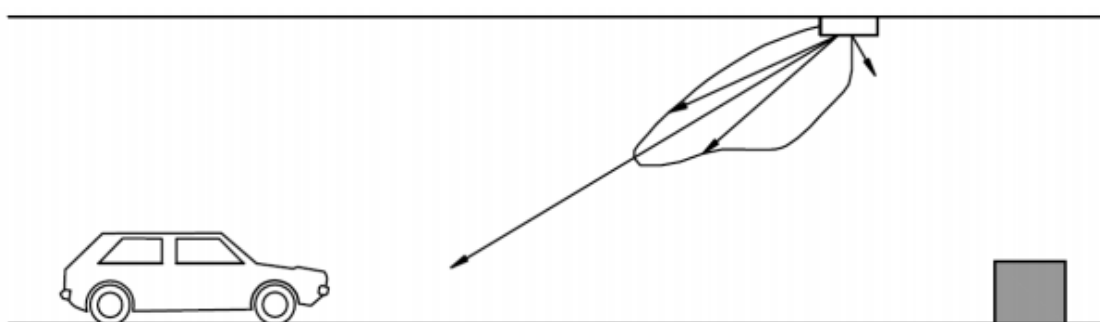


Ilustración 10. Sistema de Alumbrado a Contraflujo

Fuente: (Ministerio de Fomento de España, 2015, pág. 9)

→ Después de una evaluación visual se concluyó que los túneles evaluados tienen un alumbrado a contraflujo

Tabla 9. Sistema de Alumbrado de Túneles Evaluados

TÚNELES	Tipo de Alumbrado
Cerro Santa Ana	Contraflujo
Cerro El Carmen	Contraflujo
San Eduardo Dirección NORTE	Contraflujo
San Eduardo Dirección SUR	Contraflujo

Fuente: Elaboración Propia

OTROS TIPOS DE ALUMBRADO

Alumbrado base o permanente: Es la parte del alumbrado del túnel que se encuentra en funcionamiento permanentemente. (Ministerio de Fomento de España, 2015)

Alumbrado de Emergencia de Seguridad: Es la fracción del alumbrado del túnel que es mantenida en condiciones de emergencia que sirve para resolver algún fallo del

suministro normal de energía eléctrica a las luminarias del túnel. (Ministerio de Fomento de España, 2015)

Alumbrado de emergencia de Evacuación: Es la fracción del alumbrado del túnel que es mantenida en condiciones de emergencia que sirve para facilitar la salida inmediata de los ocupantes de los vehículos en el interior del túnel, en caso de algún incidente dentro del mismo. (Ministerio de Fomento de España, 2015)

2.3.6. PROBLEMÁTICAS DE VISIÓN EN LOS TÚNELES

La mayoría de los problemas de visión en los túneles se presentan durante el día, al momento de ingresar a estos. Los fenómenos más comunes que afectan al ojo humano son:

Adaptación Temporal

Este fenómeno se corresponde con el ajuste de la sensibilidad de una parte de la retina ante un cambio del nivel de iluminación, ya sea mayor o menor. Esto se debe al tiempo en que tarda el ojo humano en acostumbrarse a un diferente nivel de iluminación, denominado tiempo de adaptación. Este tiempo de adaptación al no ser instantáneo puede producir problemas al conductor al no poder distinguir eventuales obstáculos dentro del túnel, generalmente debido a que, durante el día la iluminación dentro del túnel es significativamente menor a la iluminación natural exterior. (Ministerio de Fomento de España, 2015)

Fenómeno de Inducción

Este fenómeno es el efecto de la influencia de las partes contiguas de la retina en la que se forma la imagen del objeto visualizado. Debido a que el ojo del conductor está adaptado a altas iluminancias exteriores, al mirar a la entrada del túnel que tiene iluminancias mucho menores, se producirá una imagen oscura que no permite distinguir los objetos que se encuentran al interior del túnel. (Ministerio de Fomento de España, 2015)



Fotografía 5. Fenómeno de Inducción

Fuente: (Ministerio de Fomento de España, 2015, pág. 10)

Luminancia de Velo

Este fenómeno produce una dificultad añadida a la propia tarea visual del conductor al entrar al túnel, que generalmente consiste en una alteración del contraste percibido entre cualquier obstáculo que se encuentre dentro de la carretera y el fondo que se percibe. Este fenómeno puede ser principalmente de tres tipos:

- Luminancia de velo debida la luz dispersada en la atmosfera en la línea de visión
- Luminancia de velo debida a la dispersión de la luz en el parabrisas del vehículo (incluyendo la luz procedente del tablero del mismo).
- Luminancia de velo debida a la dispersión de la luz en el ojo (procedente de fuentes de luz situadas fuera de la línea de visión y que se dispersa en la fóvea), conocida también como luminancia foveal o de Fry.

(Ministerio de Fomento de España, 2015)

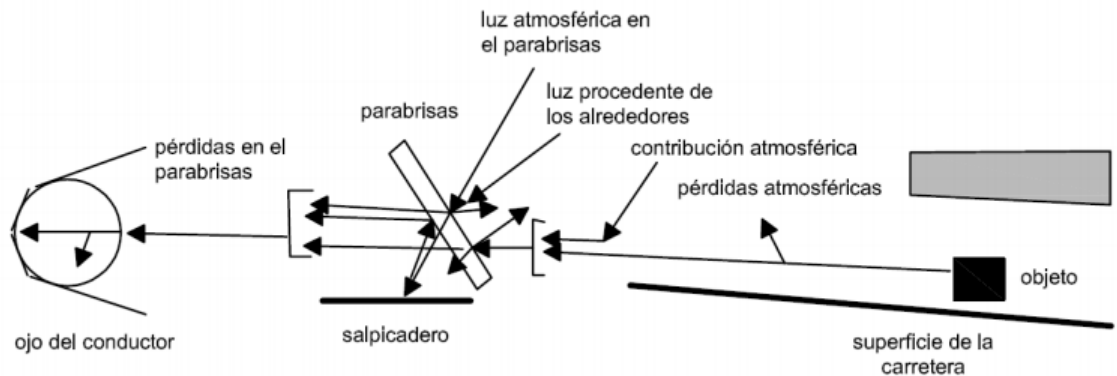


Ilustración 11. Perturbación de la Visión debido a las Iluminancias de Velo

Fuente: (Ministerio de Fomento de España, 2015, pág. 11)



Fotografía 6. Luminancia de Velo

Fuente: (Ministerio de Fomento de España, 2015, pág. 11)

OTROS FENOMENOS DE VISION DENTRO DE LOS TÚNELES

Efecto Agujero Negro: Es la sensación mediante la cual la entrada del túnel se presenta al ojo del conductor como un agujero negro, en el cual no se puede distinguir nada dentro de él. Esto se produce debido a que la luminancia ambiental en el exterior del túnel durante el día es mucho mayor que en la entrada. (Ministerio de Fomento de España, 2015)



Fotografía 8. Túnel con Efecto Agujero Negro



Fotografía 7. Túnel con Correcta Iluminación

Fuente: (Federal Highway Administration, 2009, pág. 11)

Efecto Flicker: Es la sensación de parpadeo molesto producido por cambios periódicos de la luminancia en el campo de visión, debido a separación entre las instalaciones de iluminación. Por lo general este efecto también depende de la velocidad a la que circula el vehículo. (Bickel, Kuesel, & King, 2004)

La incomodidad visual que se produce por el efecto flicker depende de:

- El número de cambios de luminancia por segundo (frecuencia flicker).
- La duración total de la experiencia flicker.
- La velocidad de cambio de claro a oscuro, en un solo ciclo.
- La relación de luminancia de pico (luz) a valle (oscuridad) dentro de cada periodo (profundidad de modulación de luminancia).

(Ministerio de Fomento de España, 2015)

Efecto Muro: Es la sensación de estrechez que percibe el conductor al circular por un lugar cerrado, debido al color oscuro de las paredes del mismo, provocando que el conductor tienda a alejarse de estas. (Ministerio de Fomento de España, 2015)

2.3.7. CONTROL DEL NIVEL DE LUMINANCIA EN TÚNELES

La luminancia de la zona de acceso L_{20} varía dependiendo de las condiciones del alumbrado natural durante el día. Los niveles de luminancia durante el día de la zona de umbral y en la zona de transición deben ser porcentajes constantes de la luminancia en la zona de acceso, para poder lograr esto es necesario contar con un control automático para el alumbrado artificial. (Ministerio de Fomento de España, 2015)

En la práctica, para poder lograr este control continuo de las luminancias dentro de la zona de umbral y de la zona de transición, generalmente se utiliza un luminancímetro con un campo de medición de 20° orientado en dirección a la boca del túnel, ubicado a una distancia igual a la distancia de parada D_p calculada para pavimento húmedo. (Ministerio de Fomento de España, 2015)

- Se examinó la existencia de instrumentos para el control del nivel luminancia fuera de los túneles evaluados en esta disertación, y se encontró que no existe ningún instrumento de control.

Tabla 10. Existencia de Instrumentos de Control en Túneles Evaluados

TÚNELES	Instrumentos de Control de Luminancia
Cerro Santa Ana	NO
Cerro El Carmen	NO
San Eduardo Dirección NORTE	NO
San Eduardo Dirección SUR	NO

Fuente: Elaboración Propia

2.3.8. INSTRUMENTOS PARA LA MEDICION DE LUMINANCIA

Luminancia (L)

En un punto de una superficie, en una dirección, se interpreta como la relación entre la intensidad luminosa en la dirección dada producida por un elemento de la superficie que rodea el punto, con el área de la proyección ortogonal del elemento de superficie

sobre un plano perpendicular en la dirección dada. (Servicio Ecuatoriano de Normalización INEN, 2012)

Es decir, luminancia se refiere a cuanta luz refleja un objeto iluminado hacia el ojo humano, esta magnitud es expresada en candelas sobre metro cuadrado (cd/m^2)

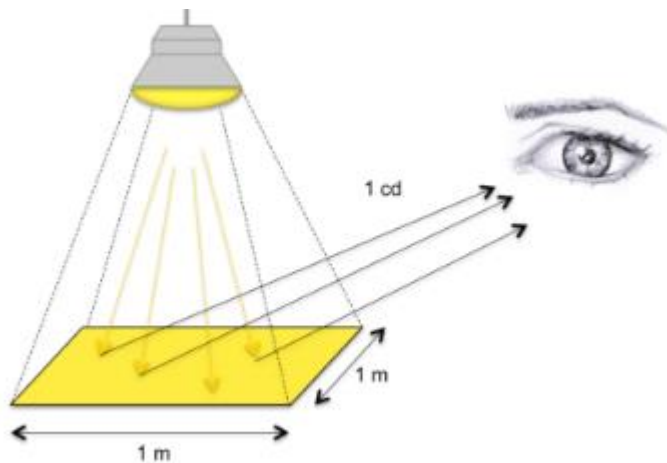


Ilustración 12. Representación de la Luminancia

Fuente: (fotografiaenfasis, 2016)

La luminancia puede ser medida con un instrumento llamado luminancimetro.

LUMINANCIMETRO

El luminancimetro es un instrumento que nos permite determinar la intensidad luminosa de cualquier tipo de fuente de luz, así como de cualquier superficie reflectora. A través del lente de este instrumento, se ve el campo que está siendo enfocado y un circulo en el centro que nos indica exactamente qué área está siendo medida. (AQinstruments, 2013)

Las mediciones con este instrumento deben ser realizadas dependiendo de la necesidad del usuario y del proyecto, para el caso de túneles deben ser realizadas dentro de cada zona del túnel, y el número de mediciones también dependerá de la longitud del túnel. Se debe utilizar la luminancia media de calzada.



Ilustración 13. Luminancímetro Mavo-Spot 2 USB

Fuente: (GOSSEN, 2017)

Para la evaluación del nivel de luminancia de los túneles dentro de esta disertación, se utilizó un luminancímetro “Mavo-Spot 2 USB” que tiene visor con 1° de círculo de medición, y un campo visual de 15° , puede medir desde 0.01 cd/m^2 hasta 99900 cd/m^2 . Este luminancímetro cumple con todos los requerimientos para medir luminancia dentro de túneles.

- En los túneles evaluados en esta disertación se realizarán 2 mediciones a lo largo de la Zona de Umbral, 4 mediciones a los largo de la Zona de Transición, y en la Zona Interior ser realizaran mediciones cada 100 metros en los Túneles del Cerro Santa Ana, y Cerro El Carmen; y cada 200 metros en los Túneles de San Eduardo.

CAPÍTULO III

3. DISEÑO DE ALUMBRADO DE TÚNELES

3.1. PROCEDIMIENTO PARA DISEÑO DEL ALUMBRADO

3.1.1. DISTANCIA DE PARADA D_p

La distancia de parada se la define como la distancia total recorrida por un vehículo obligado a detenerse tan rápidamente como le sea posible, esta comprende todo el tiempo desde que aparece el objeto que provoca la detención. Abarca la distancia recorrida durante los tiempos de percepción, reacción, y frenado. (Ministerio de Fomento de España, 2015)

Para esta distancia se considera la distancia cubierta durante el tiempo de percepción y reacción, y la distancia cubierta durante el tiempo de frenado. Se la calcula utilizando la siguiente expresión:

$$D_p = \frac{V \cdot t_p}{3,6} + \frac{V^2}{254 \cdot (f + i)}$$

Donde:

- D_p = Distancia de parada (m)
- V = Velocidad de Circulación (Km/h)
- t_p = Tiempo de percepción y reacción (s)
- f = Coeficiente de rozamiento longitudinal rueda-pavimento (adimensional)
- i = Inclinación de la rasante (tanto por uno)

El tiempo de percepción y reacción (t_p) generalmente se lo considera de **2 s** al tratarse de tramos que se encuentran iluminados.

El coeficiente f tanto para pavimentos secos, como para pavimentos húmedos se lo toma de la siguiente gráfica:

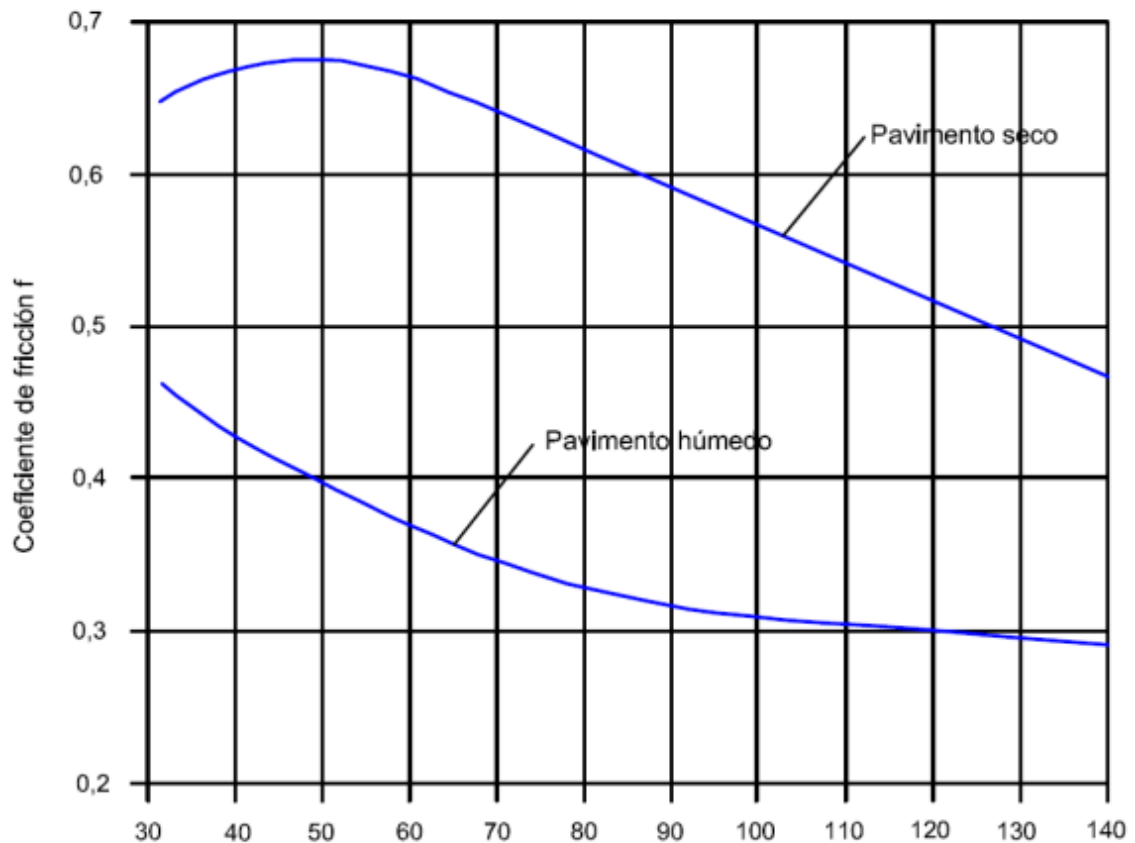


Figura 1. Diagramas Típicos del Coeficiente en Función de la Velocidad para Pavimento Seco y Húmedo

Fuente: (Ministerio de Fomento de España, 2015, págs. 5, anexo1)

En condiciones normales de circulación dentro del túnel, en las zonas de umbral se utilizará la distancia de parada en pavimento húmedo, y en el resto de las zonas se utilizará la distancia de parada en pavimento seco, excepto en casos justificados en los que exista humedad dentro del túnel. (Ministerio de Fomento de España, 2015)

3.1.2. ZONA DE ACCESO (L_{20})

DEFINICIÓN DE LA LUMINANCIA DE ACCESO L_{20}

La luminancia L_{20} se la define como la media de los valores de luminancia en un campo de visión cónico, que subtiende un ángulo de 20° por un observador situado en el punto de referencia y mirando hacia un punto centrado. Esta representa el estado de

adaptación del ojo de un conductor que se aproxima a la entrada de un túnel. (Ministerio de Fomento de España, 2015)

Para estimar los porcentajes de los componentes de L_{20} , es apropiado tomar una fotografía de la entrada del túnel a una distancia igual a la distancia de parada D_p , con eje en la línea de visión orientado hacia un punto centrado en la entrada del túnel a una altura igual a la cuarta parte de la altura de la boca del mismo. (Ministerio de Fomento

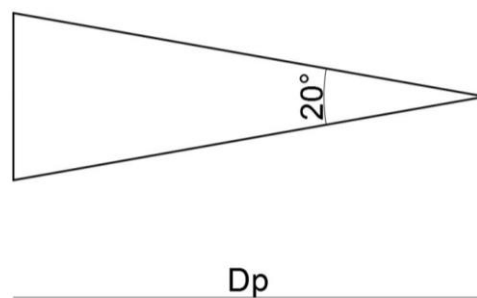


Ilustración 14. Campo de Visión Cónico de 20° a una Distancia D_p

Fuente: Elaboración Propia

de España, 2015)

El círculo de intersección del cono de observación con el plano vertical del portal es marcado en la fotografía, y las diferentes zonas de los componentes son delineadas, para así calcular su luminancia como un porcentaje del área del círculo. El área del círculo puede ser calculado, a la escala de la fotografía, a partir de una dimensión conocida de la imagen, como puede ser la altura de la boca del túnel. (Ministerio de Fomento de España, 2015)

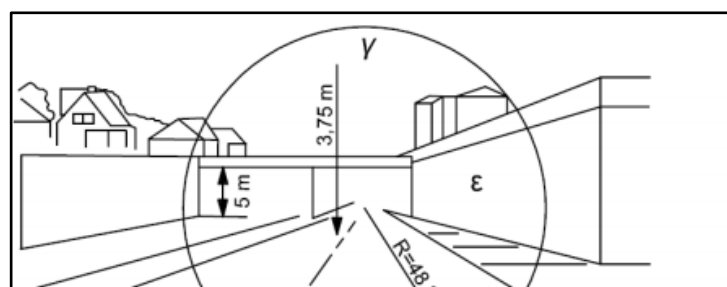


Ilustración 15. Vista en perspectiva de la entrada de un túnel con el círculo correspondiente al ángulo de visión de 20°

Fuente: (Ministerio de Fomento de España, 2015, pág. 15)

Este valor de luminancia de la zona de acceso L_{20} utilizado para diseño de alumbrado y/o control del mismo, representa la situación más desfavorable que se puede encontrar en la práctica. (Ministerio de Fomento de España, 2015)

MÉTODOS PARA DETERMINAR LA LUMINANCIA EN LA ZONA DE ACCESO L_{20}

• MÉTODO APROXIMADO

Este método debe emplearse solo en el caso que no exista suficiente información detallada de los alrededores de la boca del túnel. Estos valores están basados en estudios empíricos, y son obtenidos de la siguiente tabla: (Ministerio de Fomento de

Tabla 11. Valores Habituales de Luminancia media L_{20} en la Zona de Acceso

Luminancia media L_{20} en el campo de visión cónico de 20° , en cd/m^2 .																
	Porcentaje de cielo en el campo de visión cónico de 20°															
	35%				25%				10%				0%			
	Normal		Nieve		Normal		Nieve		Normal		Nieve		Normal		Nieve	
	Bajo	Alto	Bajo	Alto	Bajo	Alto	Bajo	Alto	Bajo	Alto	Bajo	Alto	Bajo	Alto	Bajo	Alto
Situación de claridad en campo de visión	1)		1)		1)		1)		2)		3)		2)		3)	
Distancia de parada*60 m	4)		4)		4.000	5.000	4.000	5.000	2.500	3.500	3.000	3.500	1.500	3.000	1.500	4.000
Distancia de parada* 100-160 m	4.000	6.000	4.000	6.000	4.000	6.000	4.000	6.000	3.000	5.000	3.000	5.000	2.500	4.500	2.500	5.000
NOTAS 1) Efecto fundamentalmente dependiente de la orientación del túnel. - Bajo: En el hemisferio norte-entrada sur. - Alto: En el hemisferio norte-entrada norte. - Para entradas por el este y el oeste, debería elegirse un valor medio entre "bajo" y "alto". 2) Efecto fundamentalmente dependiente de la claridad de los alrededores: - Bajo: Reflectancias de alrededores bajas. - Alto: Reflectancias de alrededores altas. 3) Efecto fundamentalmente dependiente de la orientación del túnel. - Bajo: Entrada norte. - Alto: Entrada sur. - Deberían interpolarse valores medios entre valores altos y bajos. 4) Para una distancia de parada de 60 m., no se han encontrado en la práctica porcentajes de cielo del 35%. 5) "Boca norte" significa desplazándose hacia el sur (en el hemisferio norte). *Calculada para pavimento húmedo (según apartado 2.1.1)																

España, 2015)

Fuente: (Ministerio de Fomento de España, 2015, pág. 18)

MÉTODO EXACTO

Este método debe emplearse siempre que exista una vista tridimensional de la boca del túnel. Se utiliza la siguiente expresión: (Ministerio de Fomento de España, 2015)

$$L_{20} = \gamma \cdot L_C + \rho \cdot L_R + \varepsilon \cdot L_E + \tau \cdot L_{th}$$

Donde:

- | | |
|-----------------------------------------------|------------------------------|
| - L_C = Luminancia de cielo; | γ = % de cielo |
| - L_R = Luminancia de calzada; | ρ = % de calzada |
| - L_E = Luminancia del entorno; | ε = % de entorno |
| - L_{th} = Luminancia de la zona de umbral; | τ = % de portal |

Cumpléndose:

$$\gamma + \rho + \varepsilon + \tau = 1$$

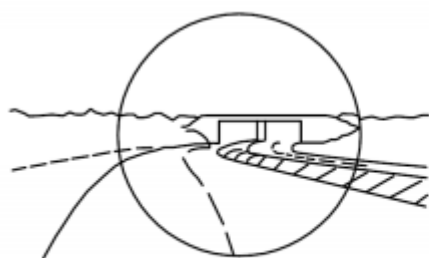
Debido a que en la formula L_{th} es una incógnita que determinar. Para distancias de parada superiores a 100 m, ya que el porcentaje de portal es bajo, y L_{th} es bajo con respecto a los otros valores, puede despreciarse la contribución de L_{th} . (Ministerio de Fomento de España, 2015)

Para distancias de parada de 60 m calculadas para pavimento húmedo, y considerando que el coeficiente k nunca excede a 0,1, se llega a la siguiente expresión:

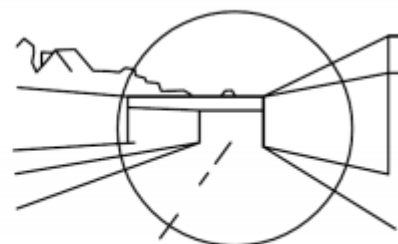
$$L_{20} = \gamma \cdot L_C + \rho \cdot L_R + \varepsilon \cdot L_E$$

Cuando no es posible determinación exacta de estos porcentajes, sus valores pueden ser evaluados a partir de fotografías o dibujos a escala. (Ministerio de Fomento de España, 2015)

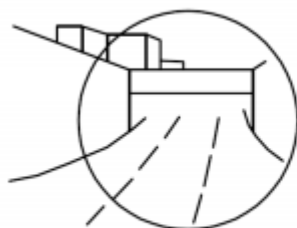
Si el porcentaje de cielo para el cálculo de L_{20} no están disponibles, se puede utilizar los siguientes dibujos para comparar la fotografía con el que más se parezca:



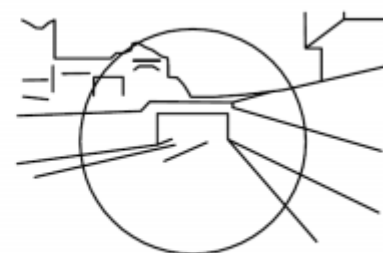
Distancia de parada 160 m. - Cielo 35%



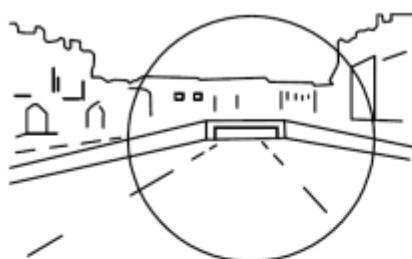
Distancia de parada 100 m. - Cielo 27%



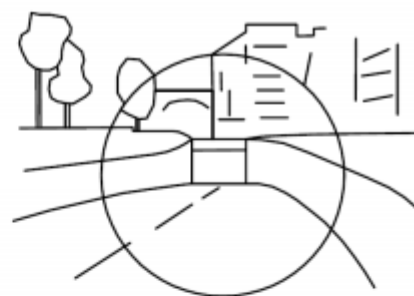
Distancia de parada 60 m. - Cielo 14%



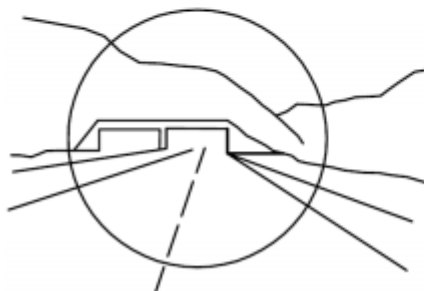
Distancia de parada 100 m. - Cielo 18%



Distancia de parada 160 m. - Cielo 14%



Distancia de parada 100 m. - Cielo 3%



Distancia de parada 100 m. - Cielo 18%



Distancia de parada 100 m. - Cielo 4%

Ilustración 16. Luminancia de la Zona de Acceso L₂₀ para Situaciones Típicas de Túneles

Fuente: (Ministerio de Fomento de España, 2015, pág. 19)

Si los valores de luminancia de los alrededores del túnel no están disponibles, los valores de L_C , L_R , y L_E , pueden ser tomados de la siguiente tabla: (Ministerio de Fomento de España, 2015)

Tabla 12. Valores de Luminancia para Distintas Superficies

Situación de la boca	L _C (cielo) kcd/m ²	L _R (calzada) kcd/m ²	L _E (cielo) kcd/m ²			
			Rocas	Edificios	Nieve	Vegetación
S	8	3	3	8	15 (V,H)	2
E-O	12	4	2	6	10 (V)	2
					15 (H)	
N	16	5	1	4	5 (V)	2
					15 (H)	
Nota: V se refiere a superficie vertical y H a superficie horizontal. "Boca norte" significa desplazándose hacia el sur (en el hemisferio norte).						

Fuente: (Ministerio de Fomento de España, 2015, pág. 20)

El valor de L_{20} obtenido por medio de este método es un valor máximo y puede estar sobreestimado debido a que, en las bocas de los túneles, los valores máximos de luminancia para calzada, cielo y alrededores nunca suelen ocurrir al mismo tiempo. (Ministerio de Fomento de España, 2015)

3.1.3. ZONA DE UMBRAL (L_{th})

ILUMINACIÓN DE LA ZONA UMBRAL

La luminancia de la zona de umbral L_{th} se establece en función a la luminancia de la zona de acceso L_{20} , y el diseño del alumbrado en la zona de umbral se basará en la determinación del coeficiente de poder revelador k que relaciona estas 2 luminancias. (Ministerio de Fomento de España, 2015)

La luminancia de la zona de umbral L_{th} debe ser proporcionada durante el día, al comienzo de la zona de umbral y a lo largo de una longitud de $0,5 D_p$. La luminancia media de la superficie de la calzada debe determinarse para la anchura total del túnel,

tomando en cuenta todos los carriles previstos que la compongan. (Ministerio de Fomento de España, 2015)

DETERMINACION DE LA LUMINANCIA DE UMBRAL L_{th}

Para determinar la luminancia en la zona de umbral L_{th} , se utiliza el coeficiente de poder revelador k , que relaciona la luminancia en la zona de umbral con la zona de acceso $k = \frac{L_{th}}{L_{20}}$. Este coeficiente depende de la distancia de parada D_p calculada para pavimento húmedo, y de la clase de túnel, a continuación, se muestra los valores recomendados para este coeficiente: (Ministerio de Fomento de España, 2015)

Tabla 13. Valores Recomendados del Coeficiente de Poder Revelador ($k = L_{th} / L_{20}$)

Clase de túnel	Distancia de parada D_p^* (m)		
	≤ 60	100	≥ 160
4	0,05	0,06	0,1
3	0,04	0,05	0,07
2	0,03	0,04	0,05
1	No hay requisitos (solamente orientación del alumbrado)		

Fuente: (Ministerio de Fomento de España, 2015, pág. 14)

LONGITUD DE LA ZONA UMBRAL

La longitud total de la Zona de Umbral debe ser al menos igual a la distancia de parada (D_p) calculada para pavimento húmedo. Durante la primera mitad de esta distancia, el nivel de luminancia debe ser igual a L_{th} . A partir de la otra mitad de esta distancia hacia adelante, el nivel de luminancia puede disminuir lineal y gradualmente hasta un valor de $0,4 L_{th}$ al final de la zona de umbral. Esta disminución durante la última mitad de la zona de umbral puede hacerse en escalones o de forma progresiva. (Ministerio de Fomento de España, 2015)

3.1.4. ZONA DE TRANSICIÓN (L_{tr})

La función de esta zona es adaptar los elevados niveles de luminancia de la zona de umbral L_{th} a los menores valores de luminancia de la zona interior L_{in} , que generalmente abarca la mayor longitud dentro del túnel.

DETERMINACIÓN DE LA ILUMINANCIA DE LA ZONA DE TRANSICIÓN

La luminancia de la zona de transición L_{tr} se calcula utilizando la siguiente expresión:

$$L_{tr} = L_{th} \cdot (1,9 + t)^{-1,423}$$

Utilizando el L_{th} al 100% (calculado para el primer tramo de la zona de umbral).

El tiempo utilizado para el cálculo de la luminancia al comienzo de la zona de transición es ($t=0$ s); los siguientes tiempos a ser utilizados deben tomar en cuenta que la relación máxima permitida para pasar de un nivel de luminancia a otro es de 3:1, hasta llegar al tiempo ($t=20$ s) que corresponde al tiempo necesario para pasar del nivel de luminancia final de la zona de umbral al del principio de la zona interior. (Ministerio de Fomento de España, 2015)

La relación máxima permitida al pasar de la zona de transición a la zona interior es de 1,5:1. La reducción de la luminancia de la zona de transición L_{tr} debe seguir la curva mostrada a continuación: (Ministerio de Fomento de España, 2015)

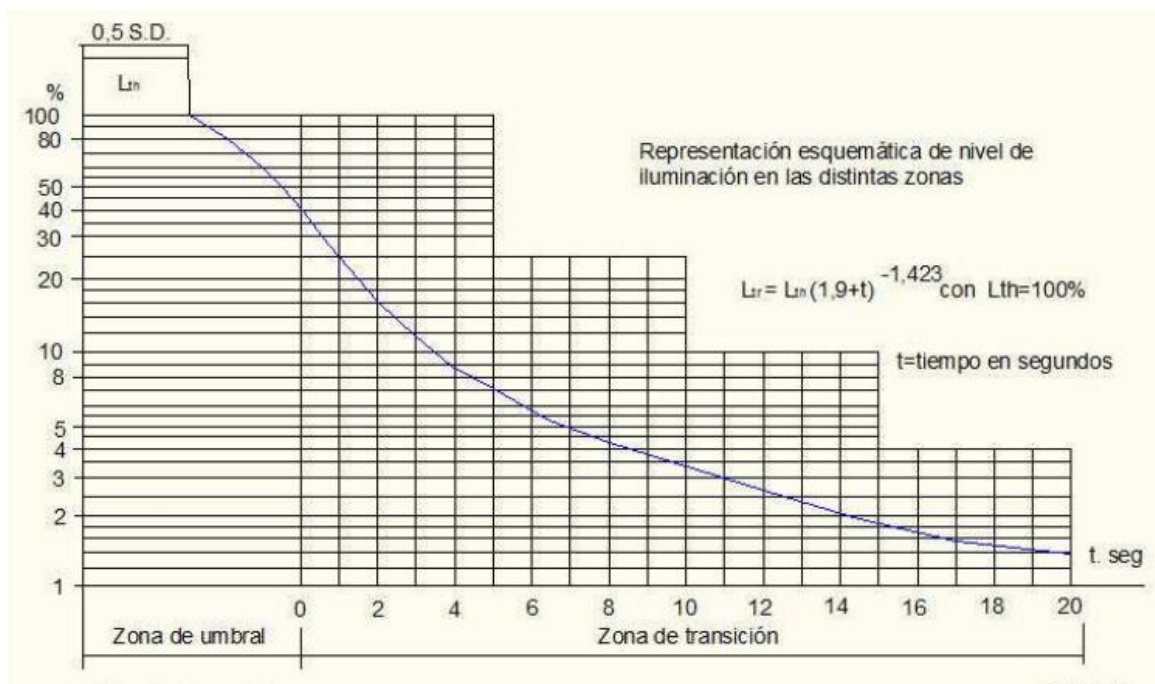


Figura 2. Zona de Transición Decreciente

Fuente: (Ministerio de Fomento de España, 2015, pág. 20)

LONGITUD DE LA ZONA DE TRANSICIÓN

La longitud de la zona de transición debe ser suficiente para permitir la adaptación del ojo del conductor, basándonos en que el tiempo necesario para pasar del nivel de luminancia final de la zona de umbral al del principio de la zona interior es de 20 segundos, basta con multiplicar la velocidad de circulación en m/s por este tiempo para obtener la longitud de la zona de transición. (Ministerio de Fomento de España, 2015)

$$l = V \cdot 20$$

Siendo l la longitud de la zona de transición en metros, y V la velocidad de circulación en m/s.

3.1.5. ZONA INTERIOR (L_{in})

Los valores de luminancia en la zona interior L_{in} están en función de la distancia de parada D_p calculada para pavimento seco y de la Clase de Túnel, y se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 14. Luminancia Media de la Superficie de la Calzada de la Zona Interior en (cd/m²)

Clase de túnel	Distancia de parada D_p^* (m)		
	≤ 60	100	≥ 160
4	3	6	10
3	2	4	6
2	1,5	2	4
1	**	0,5	1,5

Fuente: (Ministerio de Fomento de España, 2015, pág. 21)

Estos valores de luminancia son válidos tanto para el diseño como para el funcionamiento durante el día. En algunos casos la luminancia media de la superficie de calzada de los carriles de emergencia puede ser menor que la de los carriles de circulación, excepto en los túneles clase 4 que la luminancia media debe ser igual en todos los carriles. (Ministerio de Fomento de España, 2015)

3.1.6. ZONA DE SALIDA (L_{ex})

La poder asegurar una iluminación directa adecuada incluso a los vehículos pequeños precedidos por vehículos grandes, la iluminación en la zona de salida deber ser igual a la de la zona interior. En situaciones en las que puedan existir peligros cerca de la salida del túnel, se aconseja que para túneles de clase 4 la luminancia durante el día en la zona de salida debe aumentar linealmente a lo largo de una longitud igual a la distancia de parada D_p calculada para pavimento seco, a partir del nivel de la zona interior, hasta un nivel cinco veces mayor al de la zona interior a una distancia de 20 m desde la boca de salida del túnel. (Ministerio de Fomento de España, 2015)

3.1.7. ALUMBRADO NOCTURNO

- Durante la noche toda la longitud del túnel debe ser tratada de forma uniforme
- Si el túnel se encuentra dentro de un tramo iluminado de carretera, el nivel de iluminación dentro del túnel debe ser al menos igual al nivel de iluminación de la carretera de acceso
- La luminancia del túnel durante la noche no debe ser mayor que la luminancia de la zona interior L_{in} de este durante el día.

(Ministerio de Fomento de España, 2015)

- Debido a que todos los túneles evaluados en esta disertación están dentro de la clasificación de “Túneles Largos”, ya que tienen longitudes mayores a los 200 metros, no se revisará el diseño de Iluminación para túneles cortos.

3.2. DISEÑO DEL ALUMBRADO

3.2.1. DISTANCIA DE PARADA D_p

En la siguiente tabla se muestra las distancias de parada calculadas para nuestra velocidad de circulación de 50 Km/h, en condiciones de pavimento seco y pavimento húmedo, para diferentes inclinaciones de rasante.

Coefficientes de fricción (f): Pavimento Seco = 0,67
Pavimento Húmedo = 0,4

Tabla 15. Distancias de Parada para Velocidad de Circulación de 50km/h

Distancia de Parada D_p (m) con $t = 2$ s		
Inclinación de la Rasante (%)	Velocidad (Km/h)	
	50	
	f seco	f húmedo
	0,67	0,4
-8	44	59
-6	44	57
-4	43	55
-2	43	54
0	42	52
2	42	51
4	42	50
6	41	49
8	41	48

Fuente: Elaboración Propia

Basándonos en la inclinación de la rasante de cada túnel, obtenemos las siguientes distancias de parada D_p para cada túnel.

Tabla 16. Distancias de Parada para los Túneles Evaluados

TÚNELES	Inclinación de la Rasante (%)	Distancia de Parada D_p (Pavimento Seco) (m)	Distancia de Parada D_p (Pavimento Húmedo) (m)
Cerro Santa Ana	0	42	52
Cerro El Carmen	-2	43	54
San Eduardo Dirección NORTE	-5	44	56
San Eduardo Dirección SUR	5	41	49

Fuente: Elaboración Propia

3.2.2. LUMINANCIA DE LA ZONA DE ACCESO L_{20}

Para calcular la luminancia de la zona de acceso se utilizará el Método Exacto, las fotografías utilizadas para calcular los porcentajes de los componentes fueron tomadas a una distancia igual a la Distancia de Parada D_p para pavimento húmedo calculada para cada túnel.

- TÚNEL CERRO SANTA ANA



Fotografía 9. Zona de Acceso del Túnel Cerro Santa Ana

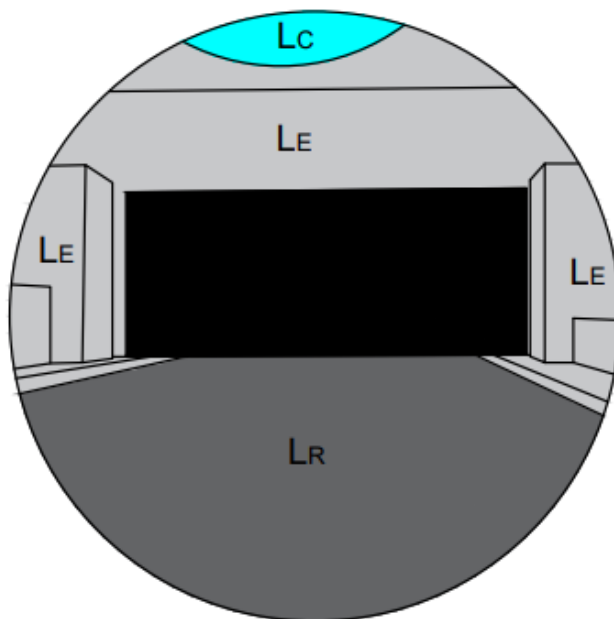


Ilustración 17. Campo de Visión Cónico de 20° del Túnel Cerro Santa Ana

Tabla 17. Componentes de L_{20} del Túnel Cerro Santa Ana

Túnel Cerro Santa Ana			
% de cielo (γ)	3	L_c (cd/m ²)	8000
% de calzada (ρ)	39	L_r (cd/m ²)	3000
% de edificios (ϵ)	31	L_e (cd/m ²)	8000
% de vegetación (ϵ)	0	L_e (cd/m ²)	2000

Fuente: Elaboración Propia

$$L_{20} = 0,03 \cdot 8000 + 0,39 \cdot 3000 + 0,35 \cdot 8000 + 0 \cdot 2000$$

$$L_{20} = 3890 \frac{cd}{m^2}$$

- TÚNEL CERRO EL CARMEN



Fotografía 10. Zona de Acceso del Túnel Cerro El Carmen

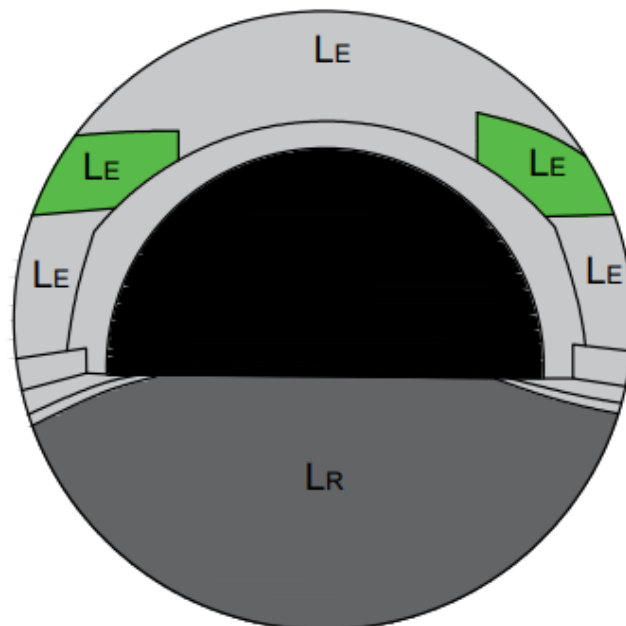


Ilustración 18. Campo de Visión Cónico de 20° del Túnel Cerro El Carmen

Tabla 18. Componentes de L_{20} del Túnel Cerro El Carmen

Túnel Cerro El Carmen			
% de cielo (γ)	0	L_c (cd/m ²)	16000
% de calzada (ρ)	36	L_R (cd/m ²)	5000
% de edificios (ϵ)	35	L_E (cd/m ²)	4000
% de vegetación (ϵ)	2	L_E (cd/m ²)	2000

Fuente: Elaboración Propia

$$L_{20} = 0 \cdot 16000 + 0,36 \cdot 5000 + 0,35 \cdot 4000 + 0,02 \cdot 2000$$

$$L_{20} = 3240 \frac{cd}{m^2}$$

- **TÚNEL SAN EDUARDO DIRECCIÓN NORTE**



Fotografía 11. Zona de Acceso del Túnel San Eduardo Dirección Norte

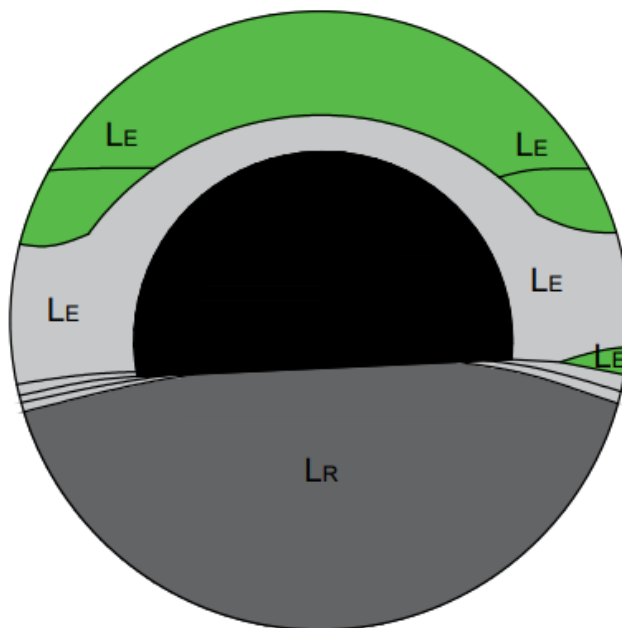


Ilustración 19. Campo de Visión Cónico de 20° del Túnel San Eduardo Dirección Norte

Tabla 19. Componentes de L_{20} del Túnel San Eduardo Dirección Norte

Túnel San Eduardo Dirección Norte			
% de cielo (γ)	0	L_C (cd/m ²)	8000
% de calzada (ρ)	38	L_R (cd/m ²)	3000
% de edificios (ϵ)	20	L_E (cd/m ²)	8000
% de vegetación (ϵ)	20	L_E (cd/m ²)	2000

Fuente: Elaboración Propia

$$L_{20} = 0 \cdot 8000 + 0,38 \cdot 3000 + 0,20 \cdot 8000 + 0,20 \cdot 2000$$

$$L_{20} = 3140 \frac{cd}{m^2}$$

- **TÚNEL SAN EDUARDO DIRECCIÓN SUR**



Fotografía 12. Zona de Acceso del Túnel San Eduardo Dirección Sur

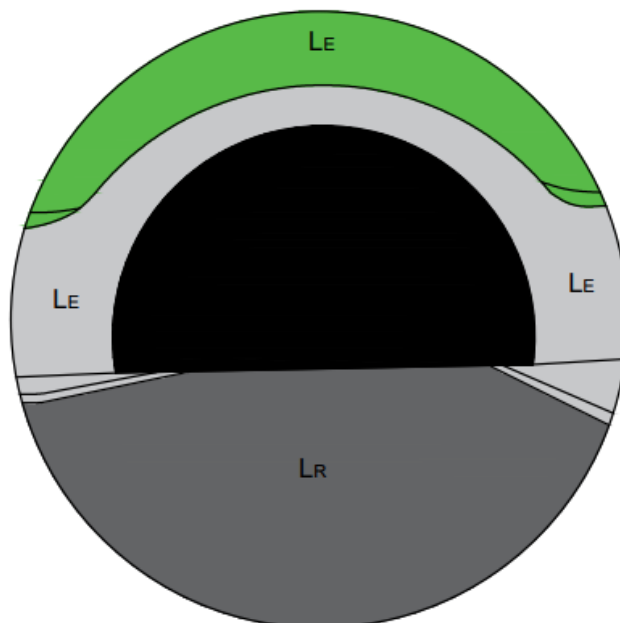


Ilustración 20. Campo de Visión Cónico de 20° del Túnel San Eduardo Dirección Sur

Tabla 20. Componentes de L_{20} del Túnel San Eduardo Dirección Sur

Túnel San Eduardo Dirección Sur			
% de cielo (γ)	0	L_C (cd/m ²)	16000
% de calzada (ρ)	38	L_R (cd/m ²)	5000
% de edificios (ϵ)	21	L_E (cd/m ²)	4000
% de vegetación (ϵ)	14	L_E (cd/m ²)	2000

Fuente: Elaboración Propia

$$L_{20} = 0 \cdot 16000 + 0,38 \cdot 5000 + 0,21 \cdot 4000 + 0,14 \cdot 2000$$

$$L_{20} = 3020 \frac{cd}{m^2}$$

3.2.3. LUMINANCIA DE LA ZONA DE UMBRAL L_{th}

A continuación, se muestran los valores del coeficiente de poder revelador k para cada túnel:

Tabla 21. Coeficiente de Poder Revelador " k " para los Túneles Evaluados

TÚNELES	Clase de Túnel	Distancia de Parada D_p (m)	Coeficiente de Poder Revelador (k)
Cerro Santa Ana	3	52	0,04
Cerro El Carmen	3	54	0,04
San Eduardo Dirección NORTE	3	56	0,04
San Eduardo Dirección SUR	3	49	0,04

Fuente: Elaboración Propia

- TÚNEL CERRO SANTA ANA**

$$L_{th} = 3890 \cdot 0,04$$

$$L_{th} = 155,6 \frac{cd}{m^2}$$

- **TÚNEL CERRO EL CARMEN**

$$L_{th} = 3240 \cdot 0,04$$

$$L_{th} = 129,6 \frac{cd}{m^2}$$

- **TÚNEL SAN EDUARDO DIRECCIÓN NORTE**

$$L_{th} = 3140 \cdot 0,04$$

$$L_{th} = 125,6 \frac{cd}{m^2}$$

- **TÚNEL SAN EDUARDO DIRECCIÓN SUR**

$$L_{th} = 3020 \cdot 0,04$$

$$L_{th} = 120,8 \frac{cd}{m^2}$$

3.2.4. LONGITUD DE LA ZONA DE UMBRAL

Para la longitud de la zona de umbral vamos a redondear las distancias de parada D_p a su valor superior múltiplo de 10.

Tabla 22. Longitud de Zona de Umbral de los Túneles Evaluados

TÚNELES	Distancia de Parada D_p (m)	Longitud de la Zona de Umbral (m)
Cerro Santa Ana	52	60
Cerro El Carmen	54	60
San Eduardo Dirección NORTE	56	60
San Eduardo Dirección SUR	49	60

Fuente: Elaboración Propia

3.2.5. LUMINANCIA DE LA ZONA DE TRANSICIÓN L_{tr}

A continuación, se muestran los niveles de luminancia calculados para el tramo inicial de la zona de transición. Los diferentes longitudes y niveles de luminancia en los distintos tramos de la zona de transición fueron calculados considerando la relación máxima de 3 a 1

- **TÚNEL CERRO SANTA ANA**

$$L_{tr} = 155,6 \cdot (1,9 + 0(s))^{-1,423}$$

$$L_{tr} = 62,4 \frac{cd}{m^2}$$

Tabla 23. Niveles de L_{tr} del Túnel Cerro Santa Ana

Túnel Cerro Santa Ana			
	$t_{inicial}$ (s)	Longitud (m)	Luminancia L_{th} (cd/m ²)
Tramo 1	0	28	62,4
Tramo 2	2	55	22,4
Tramo 3	6	84	8,2
Tramo 4	12	56	3,7
Tramo 5	16	55	2,6

Fuente: Elaboración Propia

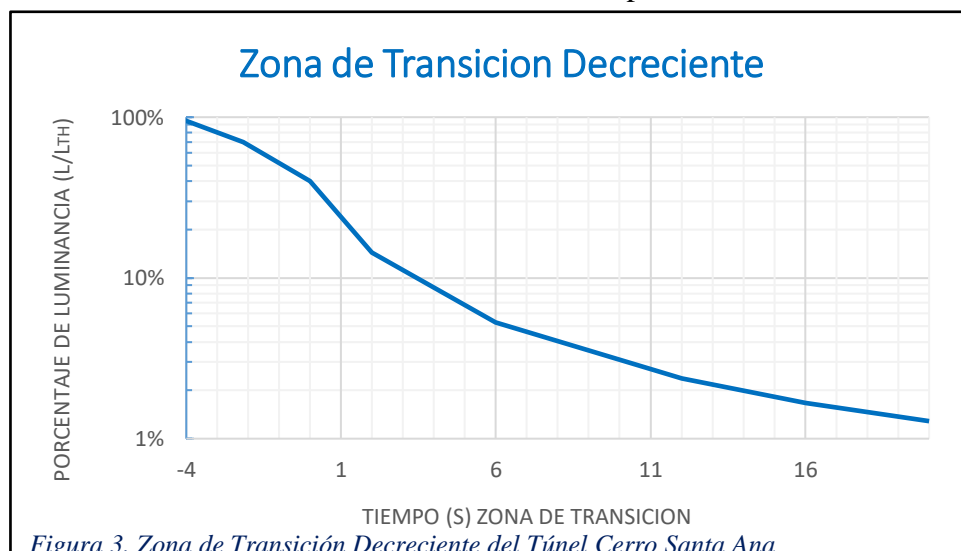


Figura 3. Zona de Transición Decreciente del Túnel Cerro Santa Ana

Fuente: Elaboración Propia

- **TÚNEL CERRO EL CARMEN**

$$L_{tr} = 129,6 \cdot (1,9 + 0(s))^{-1,423}$$

$$L_{tr} = 52,0 \frac{cd}{m^2}$$

Tabla 24. Niveles de L_{tr} del Túnel Cerro El Carmen

Túnel Cerro El Carmen			
	$t_{inicial}$ (s)	Longitud (m)	Luminancia L_{th} (cd/m ²)
Tramo 1	0	28	52
Tramo 2	2	42	19
Tramo 3	5	83	8,3
Tramo 4	11	56	3,4
Tramo 5	15	69	2,3

Fuente: Elaboración Propia

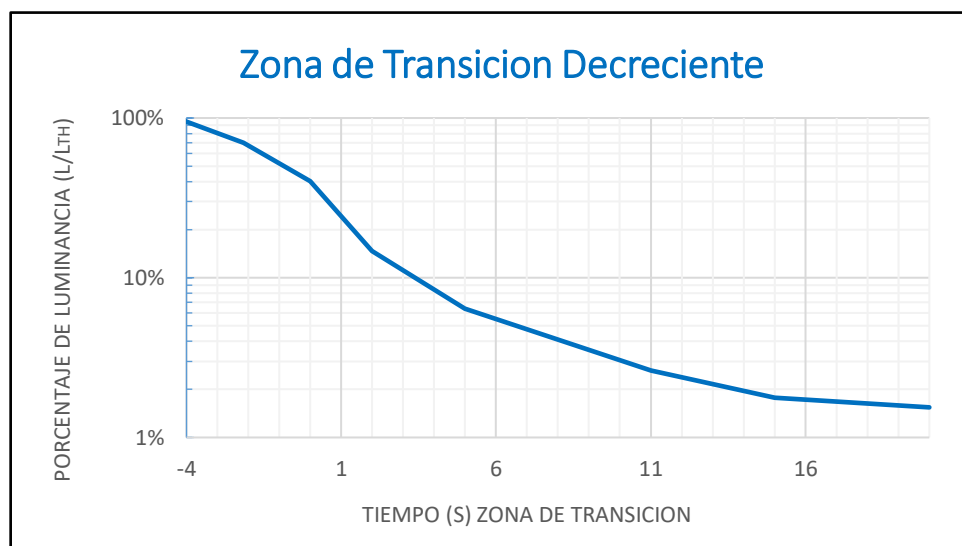


Figura 4. Zona de Transición Decreciente del Túnel Cerro El Carmen

Fuente: Elaboración Propia

- **TÚNEL SAN EDUARDO DIRECCIÓN NORTE**

$$L_{tr} = 125,6 \cdot (1,9 + 0(s))^{-1,423}$$

$$L_{tr} = 50,4 \frac{cd}{m^2}$$

Tabla 25. Niveles de Ltr del Túnel Cerro San Eduardo Dirección Norte

Túnel San Eduardo Dirección Norte			
	t inicial (s)	Longitud (m)	Luminancia L _{th} (cd/m ²)
Tramo 1	0	28	50,4
Tramo 2	2	42	18,1
Tramo 3	5	83	8,1
Tramo 4	11	42	3,3
Tramo 5	14	83	2,5

Fuente: Elaboración Propia

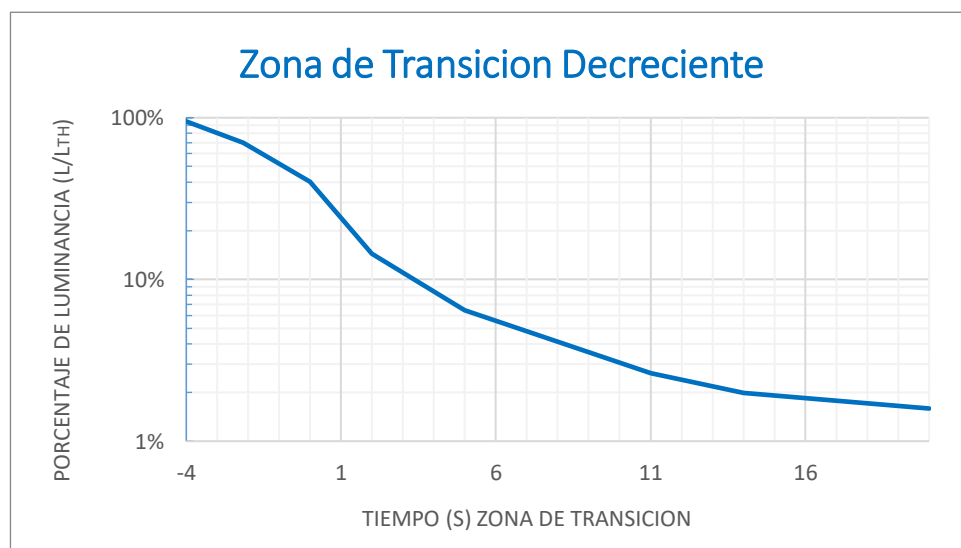


Figura 5. Zona de Transición Decreciente del Túnel San Eduardo Dirección Norte

Fuente: Elaboración Propia

- **TÚNEL SAN EDUARDO DIRECCIÓN SUR**

$$L_{tr} = 120,8 \cdot (1,9 + 0(s))^{-1,423}$$

$$L_{tr} = 48,5 \frac{cd}{m^2}$$

Tabla 26. Niveles de L_{tr} del Túnel Cerro San Eduardo Dirección Sur

Túnel San Eduardo Dirección Sur			
	$t_{inicial}$ (s)	Longitud (m)	Luminancia L_{th} (cd/m ²)
Tramo 1	0	28	48,5
Tramo 2	2	55	17,4
Tramo 3	6	84	6,4
Tramo 4	12	28	2,9
Tramo 5	14	83	2,4

Fuente: Elaboración Propia

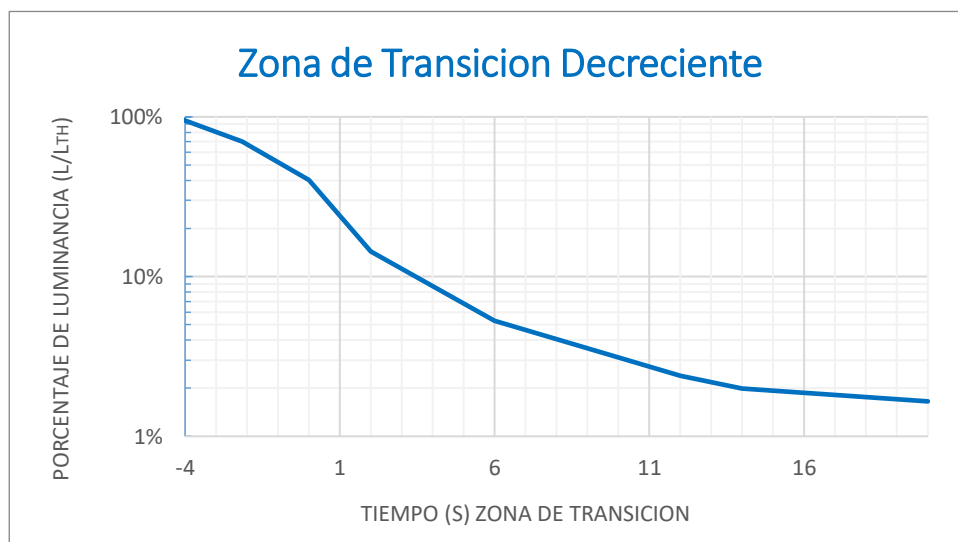


Figura 6. Zona de Transición Decreciente del Túnel San Eduardo Dirección Sur

Fuente: Elaboración Propia

3.2.6. LONGITUD DE LA ZONA DE TRANSICIÓN

Utilizando un tiempo de adaptación de 20 segundos y la velocidad de circulación de 50 km/h que pertenece a los túneles evaluados, obtuvimos las siguientes longitudes de zona de transición.

Tabla 27. Longitud de Zona de Transición de los Túneles Evaluados

TÚNELES	Velocidad Max. Circulación (Km/h)	Longitud de la Zona de Transición (m) con t=20 (s)
Cerro Santa Ana	50	278
Cerro El Carmen	50	278
San Eduardo Dirección NORTE	50	278
San Eduardo Dirección SUR	50	278

Fuente: Elaboración Propia

3.2.7. LUMINANCIA DE LA ZONA INTERIOR L_{in}

A continuación, se muestra el nivel de luminancia de la zona de interior de los túneles evaluados, basándonos en la distancia de parada D_p calculada para pavimento seco, y la clase de túnel.

Tabla 28. Luminancia de la Zona Interior de los Túneles Evaluados

TÚNELES	Clase de Túnel	Distancia de Parada D_p (m)	Luminancia de la Zona Interior L_{in} (cd/m ²)
Cerro Santa Ana	3	42	2
Cerro El Carmen	3	43	2
San Eduardo Dirección NORTE	3	44	2
San Eduardo Dirección SUR	3	41	2

Fuente: Elaboración Propia

3.2.8. LUMINANCIA DE LA ZONA DE SALIDA L_{ex}

Para mayor seguridad, la luminancia en la zona de salida se mantendrá igual a la de la zona interior, debido a que los túneles evaluados son clase 3.

Tabla 29. Luminancia de la Zona de Salida de los Túneles Evaluados

TÚNELES	Clase de Túnel	Luminancia de la Zona de Salida L_{ex} (cd/m ²)
Cerro Santa Ana	3	2
Cerro El Carmen	3	2
San Eduardo Dirección NORTE	3	2
San Eduardo Dirección SUR	3	2

Fuente: Elaboración Propia

CAPÍTULO IV

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. TÚNEL CERRO SANTA ANA

Tabla 30. Propiedades del Túnel Cerro Santa Ana

Túnel Cerro Santa Ana		
Longitud	540	(m)
Altura	5	(m)
Ancho	10,15	(m)
Velocidad de Circulación	50	(Km/h)
D _p Pavimento Seco	42	(m)
D _p Pavimento Humedo	52	(m)
Tipo de Iluminación	Alumbrado a Contraflujo	

Fuente: Elaboración Propia

NIVELES DE LUMINANCIA DE DISEÑO

Tabla 31. Niveles de Luminancia del Túnel Cerro Santa Ana

Túnel Cerro Santa Ana				
		Longitud (m)	Longitud Acum (m)	Luminancia (cd/m ²)
Zona de Acceso (L_{20})		0	0	3890
Zona de Umbral (L_{th})	Tramo 1	30	30	155,6
	Tramo 2	30	60	109
Zona de Transición (L_{tr})	Tramo 1	28	88	62,4
	Tramo 2	55	143	22,4
	Tramo 3	84	227	8,2
	Tramo 4	56	283	3,7
	Tramo 5	55	338	2,6
Zona Interior (L_{in})		142	480	2
Zona de Salida (L_{ex})		60	540	2

Fuente: Elaboración Propia

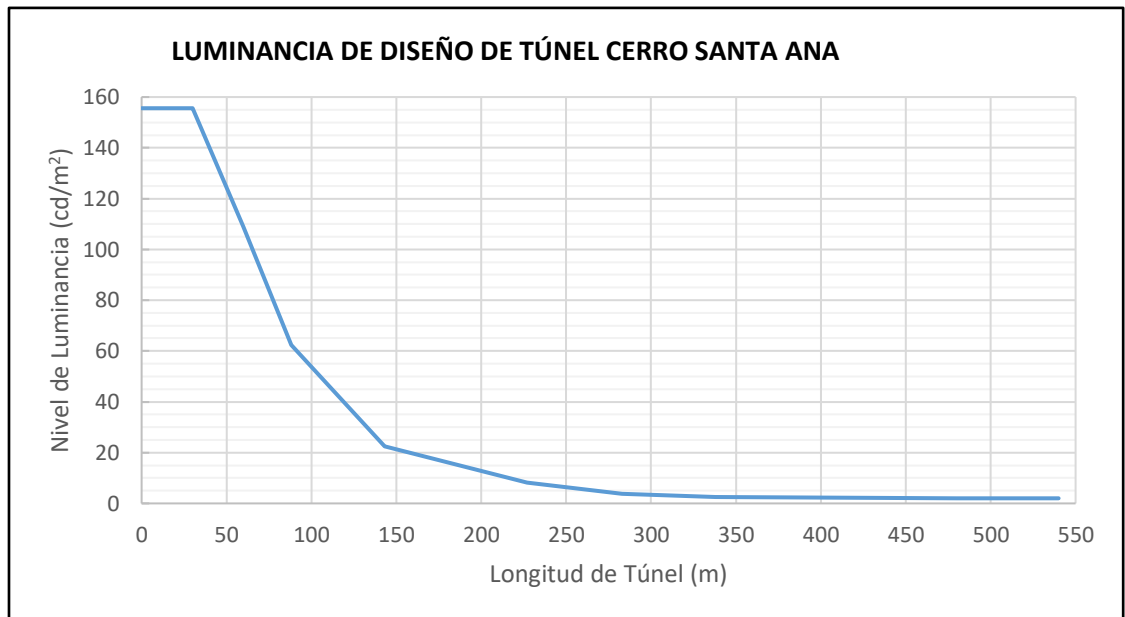


Figura 7. Niveles de Luminancia del Túnel Cerro Santa Ana

Fuente: Elaboración Propia

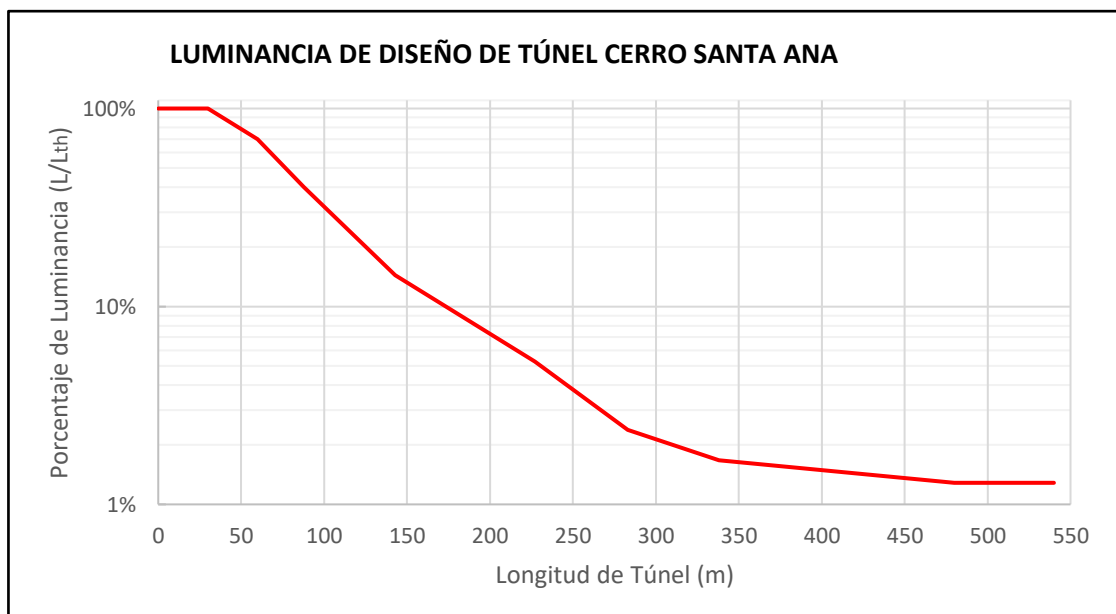


Figura 8. Porcentaje de Luminancia del Túnel Cerro Santa Ana

Fuente: Elaboración Propia

NIVELES DE LUMINANCIA MEDIDOS EN CAMPO

Tabla 32. Niveles de Luminancia Existente en el Túnel Cerro Santa Ana

Túnel Cerro Santa Ana		
Longitud (m)	Longitud Acum (m)	Luminancia Media (cd/m ²)
30	30	80
30	60	55
30	90	25
70	160	10
90	250	3
90	340	2
100	440	3
100	540	3

Fuente: Elaboración Propia

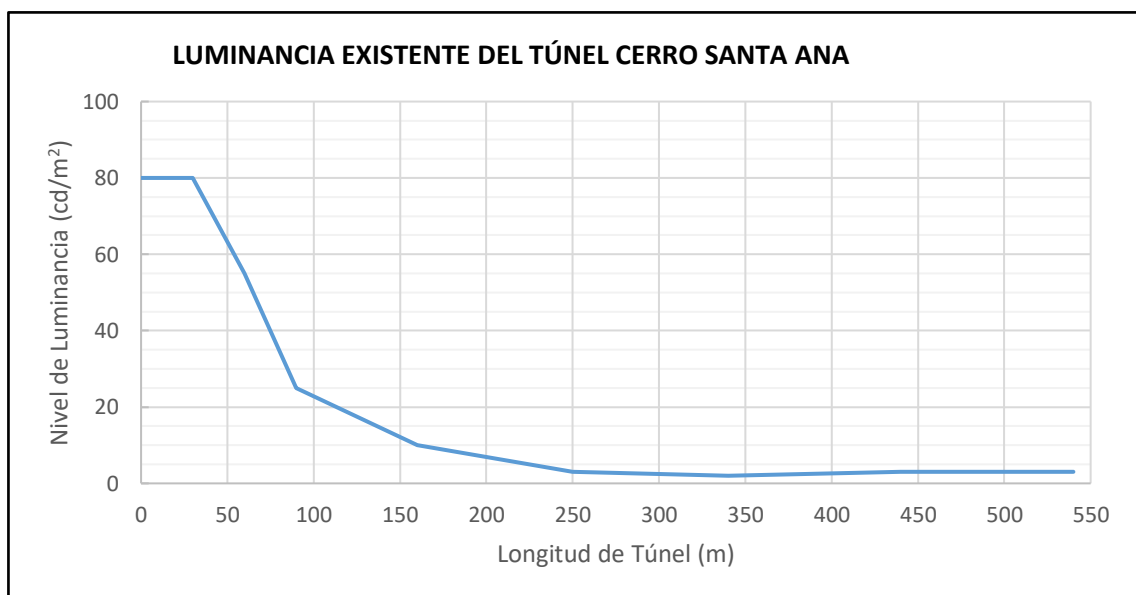


Figura 9. Niveles de Luminancia Existente en el Túnel Cerro Santa Ana

Fuente: Elaboración Propia

4.2. TÚNEL CERRO EL CARMEN

Tabla 33. Propiedades del Túnel Cerro El Carmen

Túnel Cerro El Carmen		
Longitud	745	(m)
Altura	7	(m)
Ancho	10,55	(m)
Velocidad de Circulación	50	(Km/h)
D _p Pavimento Seco	43	(m)
D _p Pavimento Humedo	54	(m)
Tipo de Iluminación	Alumbrado a Contraflujo	

Fuente: Elaboración Propia

NIVELES DE LUMINANCIA DISEÑADOS

Tabla 34. Niveles de Luminancia del Túnel Cerro El Carmen

Túnel Cerro El Carmen				
		Longitud (m)	Longitud Acum (m)	Luminancia (cd/m ²)
Zona de Acceso (L_{20})		0	0	3240
Zona de Umbral (L_{th})	Tramo 1	30	30	129,6
	Tramo 2	30	60	90,8
Zona de Transición (L_{tr})	Tramo 1	28	88	52
	Tramo 2	42	130	19
	Tramo 3	83	213	8,3
	Tramo 4	56	269	3,4
	Tramo 5	69	338	2,3
Zona Interior (L_{in})		347	685	2
Zona de Salida (L_{ex})		60	745	2

Fuente: Elaboración Propia

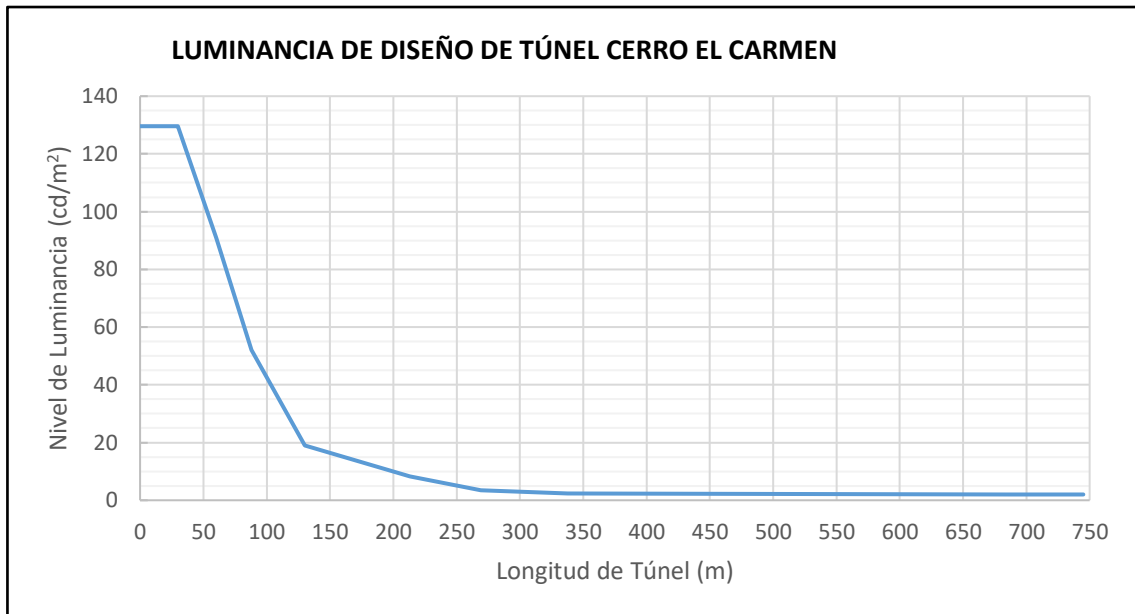


Figura 10. Niveles de Luminancia del Túnel Cerro El Carmen

Fuente: Elaboración Propia

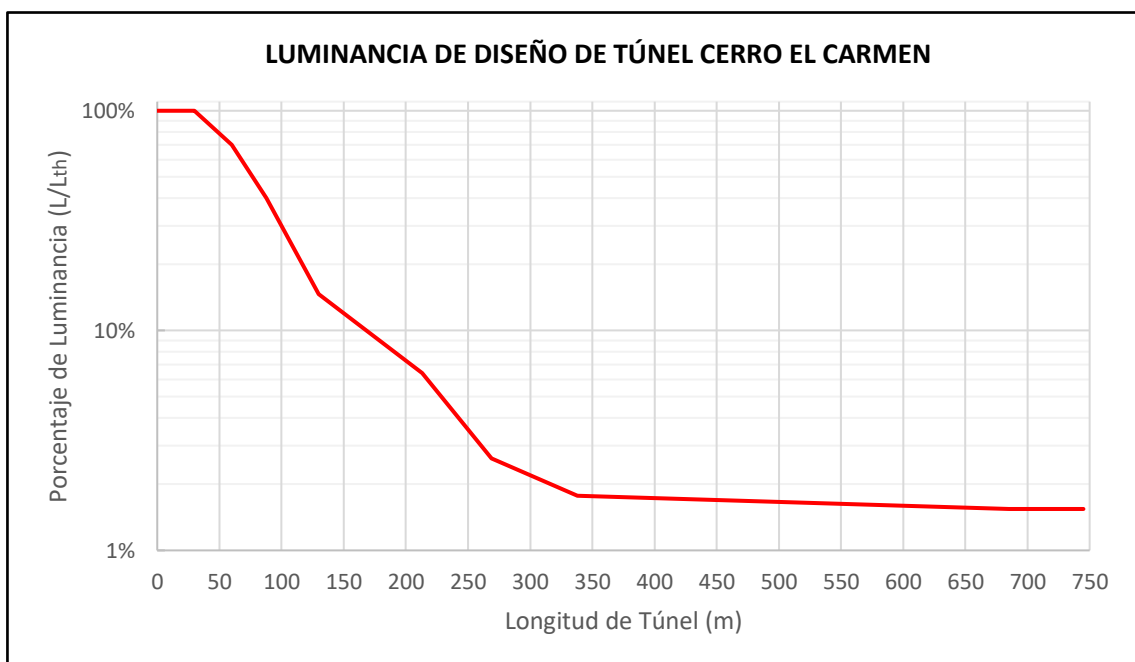


Figura 11. Porcentaje de Luminancia del Túnel Cerro El Carmen

Fuente: Elaboración Propia

NIVELES DE LUMINANCIA MEDIDOS EN CAMPO

Tabla 35. Niveles de Luminancia Existente en el Túnel Cerro El Carmen

Túnel Cerro El Carmen		
Longitud (m)	Longitud Acum (m)	Luminancia Media (cd/m ²)
30	30	70
30	60	50
30	90	20
70	160	8
90	250	3
90	340	3
100	440	2
100	540	2
100	640	3
100	740	3

Fuente: Elaboración Propia

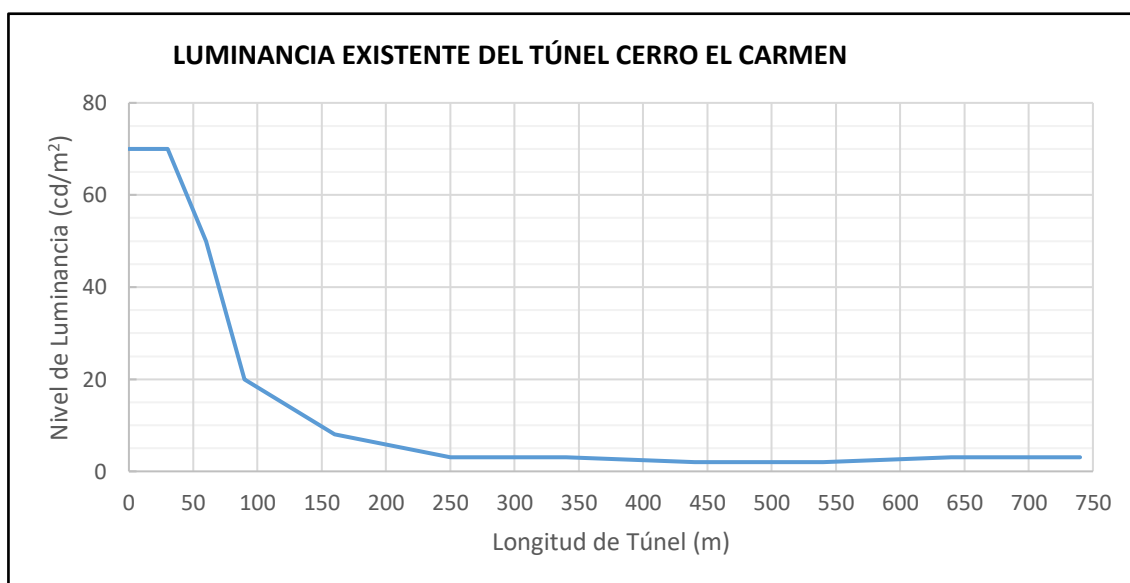


Figura 12. Niveles de Luminancia Existente en el Túnel Cerro El Carmen

Fuente: Elaboración Propia

4.3. TÚNEL SAN EDUARDO DIRECCIÓN NORTE

Tabla 36. Propiedades del Túnel San Eduardo Dirección Norte

Túnel San Eduardo Dirección Norte		
Longitud	1295	(m)
Altura	7	(m)
Ancho	10,15	(m)
Velocidad de Circulación	50	(Km/h)
D _p Pavimento Seco	44	(m)
D _p Pavimento Humedo	56	(m)
Tipo de Iluminación	Alumbrado a Contraflujo	

Fuente: Elaboración Propia

NIVELES DE LUMINANCIA DISEÑADOS

Tabla 37. Niveles de Luminancia del Túnel San Eduardo Dirección Norte

Túnel San Eduardo Dirección Norte				
		Longitud (m)	Longitud Acum (m)	Luminancia (cd/m ²)
Zona de Acceso (L_{20})		0	0	3140
Zona de Umbral (L_{th})	Tramo 1	30	30	125,6
	Tramo 2	30	60	88
Zona de Transición (L_{tr})	Tramo 1	28	88	50,4
	Tramo 2	42	130	18,1
	Tramo 3	83	213	8,1
	Tramo 4	42	255	3,3
	Tramo 5	83	338	2,5
Zona Interior (L_{in})		897	1235	2
Zona de Salida (L_{ex})		60	1295	2

Fuente: Elaboración Propia

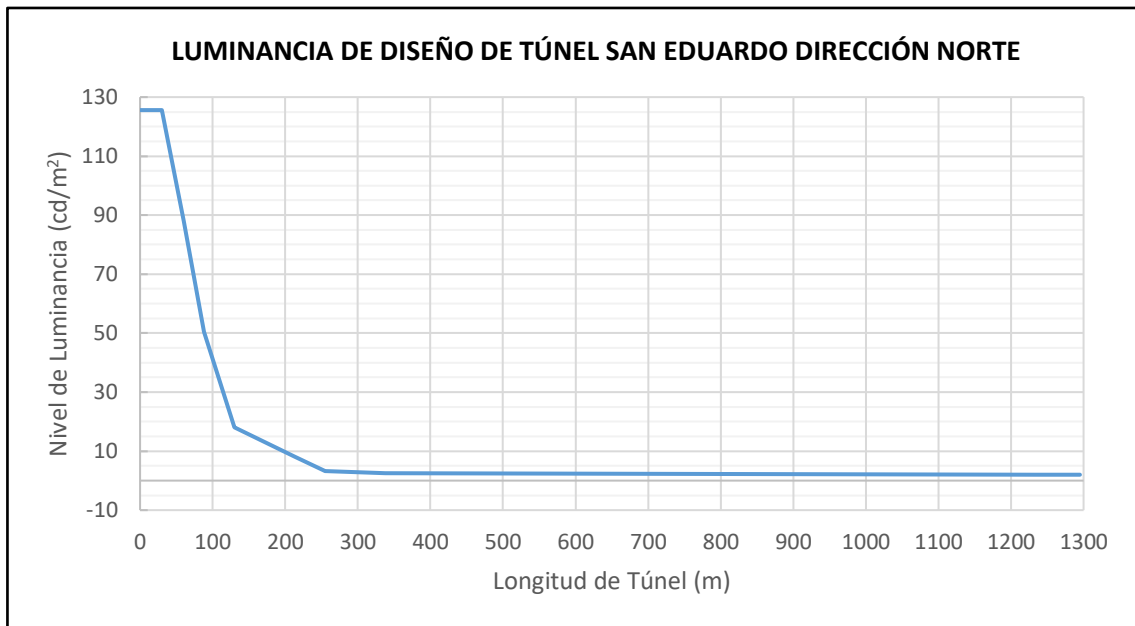


Figura 13. Niveles de Luminancia del Túnel San Eduardo Dirección Norte

Fuente: Elaboración Propia

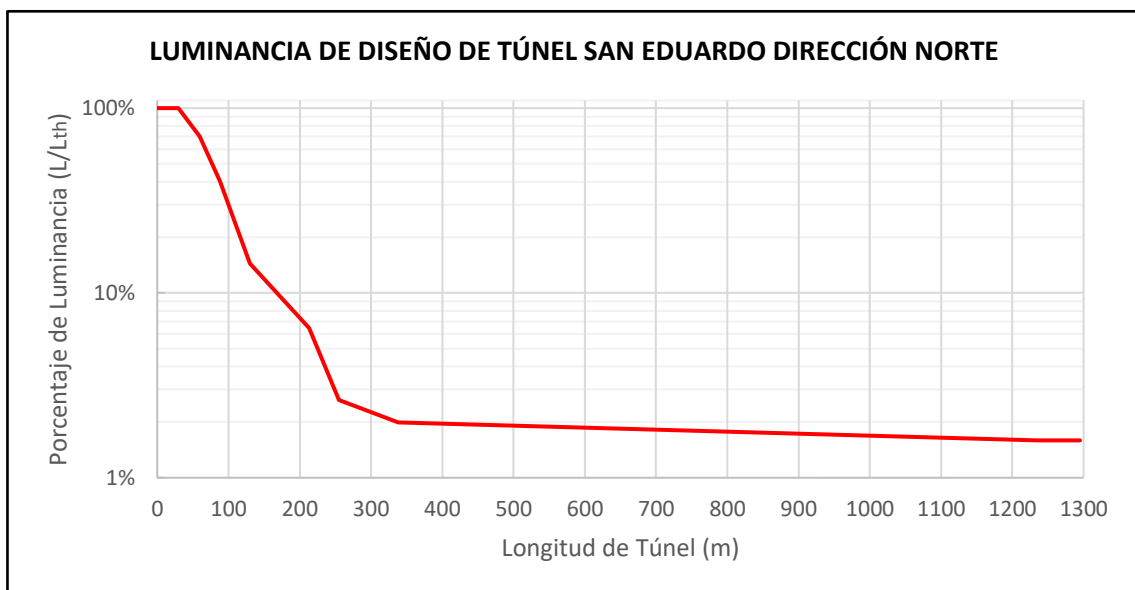


Figura 14. Porcentaje de Luminancia del Túnel San Eduardo Dirección Norte

Fuente: Elaboración Propia

NIVELES DE LUMINANCIA MEDIDOS EN CAMPO

Tabla 38. Niveles de Luminancia Existente en el Túnel San Eduardo Dirección Norte

Túnel San Eduardo Dirección Norte		
Longitud (m)	Longitud Acum (m)	Luminancia Media (cd/m ²)
30	30	75
30	60	55
30	90	35
70	160	12
90	250	4
90	340	3
200	540	3
200	740	2
200	940	3
200	1140	2
100	1240	3

Fuente: Elaboración Propia

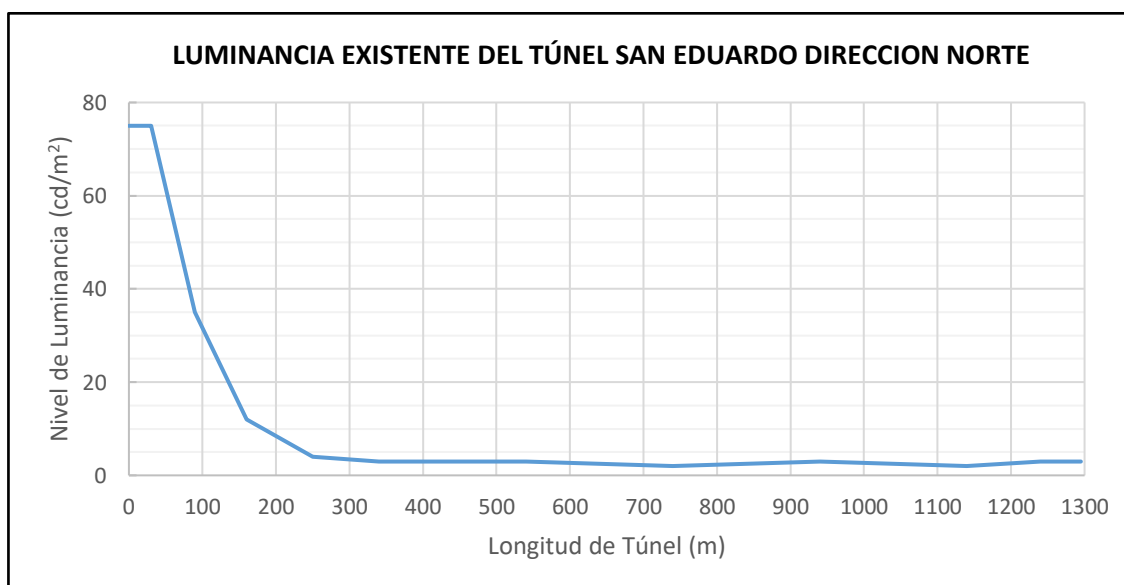


Figura 15. Niveles de Luminancia Existente en el Túnel San Eduardo Dirección Norte

Fuente: Elaboración Propia

4.4. TÚNEL SAN EDUARDO DIRECCIÓN SUR

Tabla 39. Propiedades del Túnel San Eduardo Dirección Sur

Túnel San Eduardo Dirección Sur		
Longitud	1295	(m)
Altura	7	(m)
Ancho	10,15	(m)
Velocidad de Circulación	50	(Km/h)
D _p Pavimento Seco	41	(m)
D _p Pavimento Humedo	49	(m)
Tipo de Iluminación	Alumbrado a Contraflujo	

Fuente: Elaboración Propia

NIVELES DE LUMINANCIA DISEÑADOS

Tabla 40. Niveles de Luminancia del Túnel San Eduardo Dirección Sur

Túnel San Eduardo Dirección Sur				
		Longitud (m)	Longitud Acum (m)	Luminancia (cd/m ²)
Zona de Acceso (L_{20})		0	0	3020
Zona de Umbral (L_{th})	Tramo 1	30	30	120,8
	Tramo 2	30	60	84,7
Zona de Transición (L_{tr})	Tramo 1	28	88	48,5
	Tramo 2	55	143	17,4
	Tramo 3	84	227	6,4
	Tramo 4	28	255	2,9
	Tramo 5	83	338	2,4
Zona Interior (L_{in})		897	1235	2
Zona de Salida (L_{ex})		60	1295	2

Fuente: Elaboración Propia

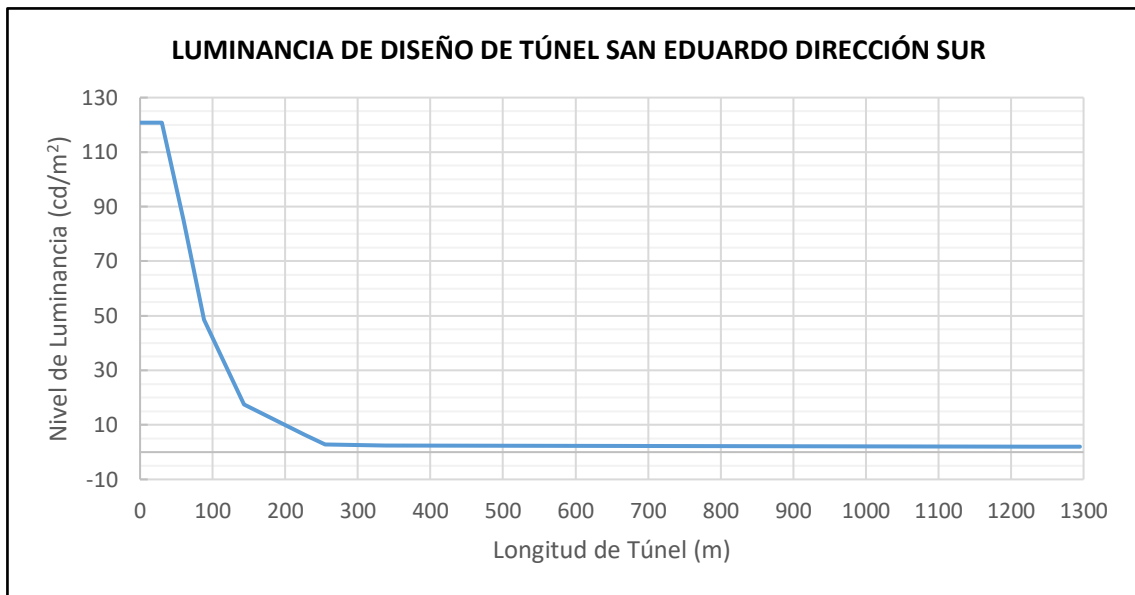


Figura 16. Niveles de Luminancia del Túnel San Eduardo Dirección Sur

Fuente: Elaboración Propia

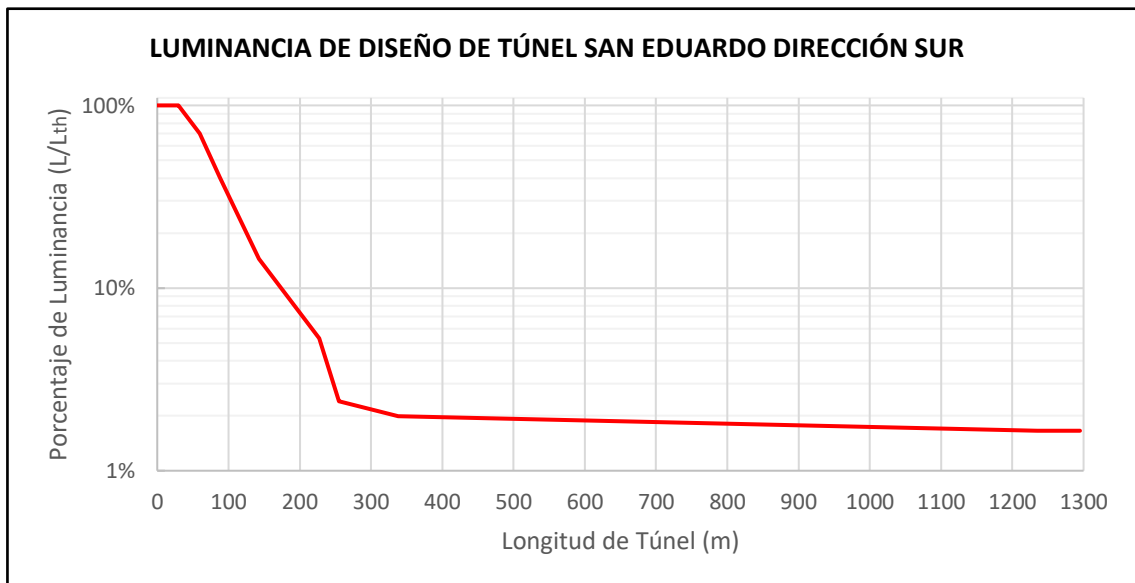


Figura 17. Porcentaje de Luminancia del Túnel San Eduardo Dirección Sur

Fuente: Elaboración Propia

NIVELES DE LUMINANCIA MEDIDOS EN CAMPO

Tabla 41. Niveles de Luminancia Existente en el Túnel San Eduardo Dirección Sur

Túnel San Eduardo Dirección Sur		
Longitud (m)	Longitud Acum (m)	Luminancia Media (cd/m ²)
30	30	70
30	60	57
30	90	30
70	160	11
90	250	4
90	340	3
200	540	3
200	740	2
200	940	3
200	1140	3
100	1240	3

Fuente: Elaboración Propia

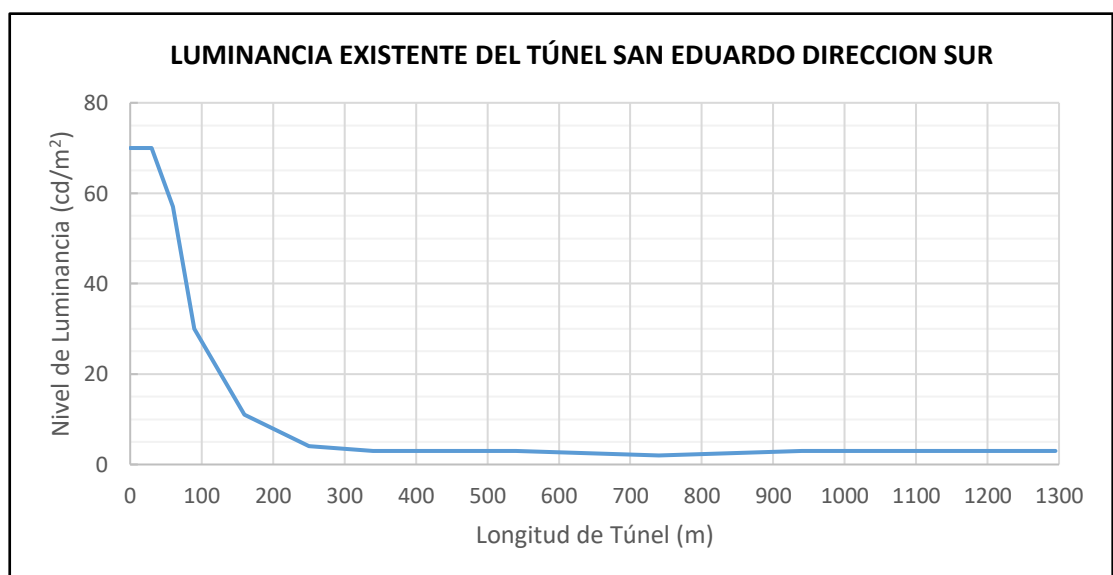


Figura 18. Niveles de Luminancia Existente en el Túnel San Eduardo Dirección Sur

Fuente: Elaboración Propia

4.5. COMPARACION DE RESULTADOS OBTENIDOS

TÚNEL CERRO SANTA ANA

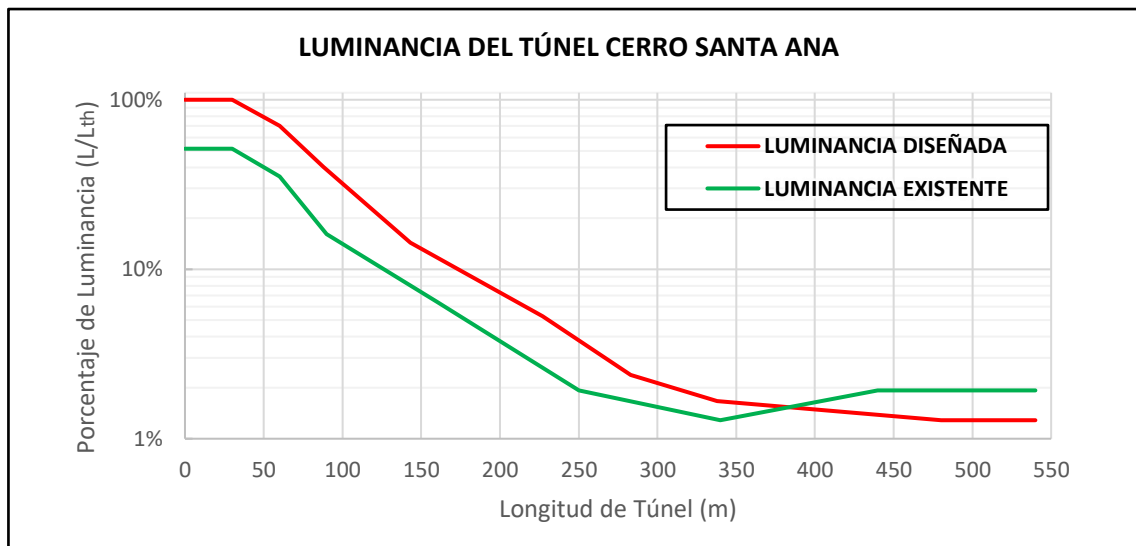


Figura 19. Luminancia de Diseño vs Luminancia Existente del Túnel Cerro Santa Ana

Fuente: Elaboración Propia

- Como se puede observar, el nivel de luminancia existente en el Túnel Cerro Santa Ana está por debajo del nivel adecuado de luminancia que exige la Normativa Técnica de Carreteras de España “Orden Circular 36/2015, a lo largo de las zonas más crítica del túnel como es la Zona de Umbral y la Zona de Transición.
- En nivel de luminancia interior existente esta por encima del nivel de luminancia de diseño, por lo que podemos decir que es adecuado.

TÚNEL CERRO EL CARMEN

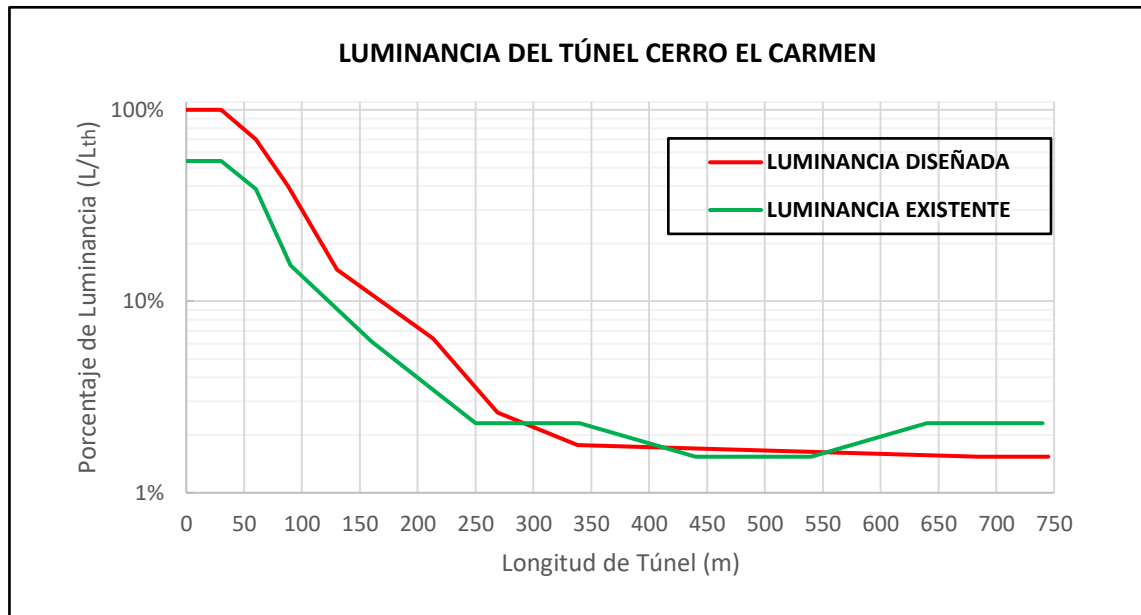


Figura 20. Luminancia de Diseño vs Luminancia Existente del Túnel Cerro El Carmen

Fuente: Elaboración Propia

- Como se puede observar, el nivel de luminancia existente en el Túnel Cerro El Carmen está por debajo del nivel adecuado de luminancia que exige la Normativa Técnica de Carreteras de España “Orden Circular 36/2015 a lo largo de las zonas más crítica del túnel como es la Zona de Umbral y la Zona de Transición.
- A lo largo de la Zona interior del túnel el nivel de luminancia existente es variante, y esto se debe a que existían varias luminarias que se encontraban apagadas o deterioradas.

TÚNEL SAN EDUARDO DIRECCION NORTE

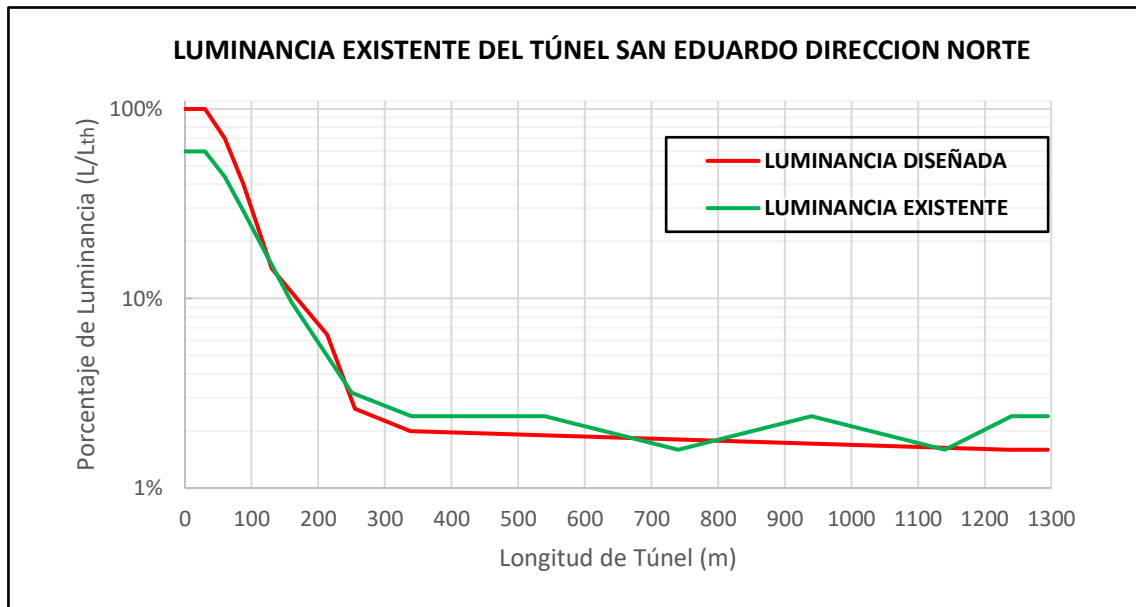


Figura 21. Luminancia de Diseño vs Luminancia Existente del Túnel San Eduardo Dirección Norte

Fuente: Elaboración Propia

- Como se puede observar, el nivel de luminancia existente en el Túnel San Eduardo Dirección Norte está por debajo del nivel adecuado de luminancia que exige la Normativa Técnica de Carreteras de España “Orden Circular 36/2015 a lo largo de las zonas más crítica del túnel como es la Zona de Umbral y un tramo de la Zona de Transición.
- A lo largo de la Zona interior del túnel el nivel de luminancia existente es variante, y esto se debe a que existían varias luminarias que se encontraban apagadas o deterioradas.

TÚNEL SAN EDUARDO DIRECCION SUR

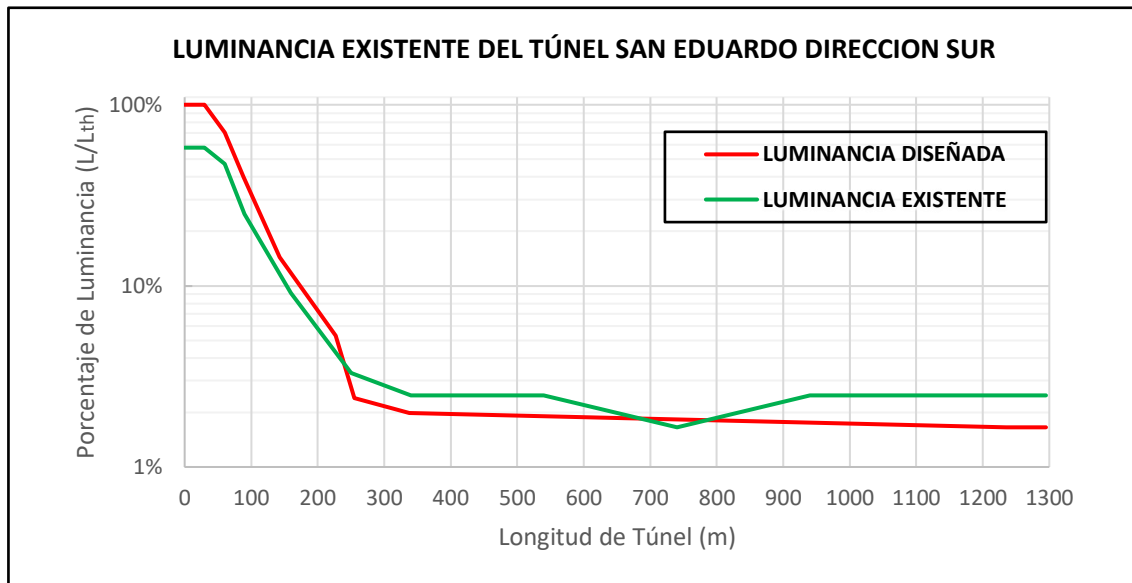


Figura 22. Luminancia de Diseño vs Luminancia Existente del Túnel San Eduardo Dirección Sur

Fuente: Elaboración Propia

- Como se puede observar, el nivel de luminancia existente en el Túnel San Eduardo Dirección Sur está por debajo del nivel adecuado de luminancia que exige la Normativa Técnica de Carreteras de España “Orden Circular 36/2015 a lo largo de las zonas más crítica del túnel como es la Zona de Umbral y de la Zona de Transición.
- A lo largo de la Zona interior del túnel el nivel de luminancia existente cumple en su mayoría, a excepción de zonas donde existían luminarias que se encontraban apagadas.

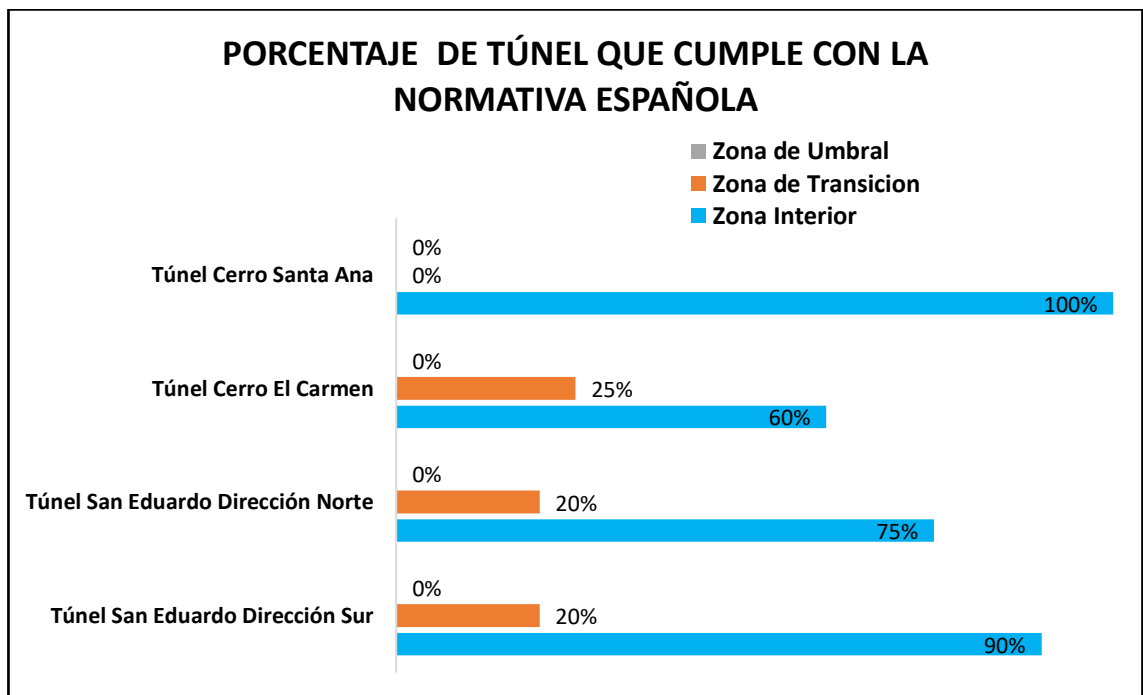


Figura 23. Porcentaje de los Túneles Evaluados que Cumplen con la Normativa Española

Fuente: Elaboración Propia

4.6. EFECTO AGUJERO NEGRO EN LOS TUNELES EVALUADOS



Fotografía 14. Efecto Agujero Negro en Túnel Cerro Santa Ana



Fotografía 13. Efecto Agujero Negro en Túnel Cerro El Carmen



Fotografía 16. Efecto Agujero Negro en Túnel San Eduardo Dirección Norte



Fotografía 15. Efecto Agujero Negro en Túnel San Eduardo Dirección Sur

Tabla 42. Presencia de Efecto Agujero Negro en Túneles Evaluados

TÚNELES	Presencia de Agujero Negro
Cerro Santa Ana	SI
Cerro El Carmen	SI
San Eduardo Dirección NORTE	SI
San Eduardo Dirección SUR	SI

Fuente: Elaboración Propia

- Al presentarse el efecto agujero negro en los túneles evaluados, se puede afirmar que existe una deficiencia en el nivel de iluminación existente en la Zona de Umbral.

4.7. EVALUACION DE LA ILUMINACION

- A continuación, se muestra si la iluminación de los túneles evaluados dentro de esta disertación cumple con los valores respecto a la Normativa Técnica de Carreteras de España “Orden Circular 36/2015.

Tabla 43. Evaluación de Correcta Iluminación en los Túneles Evaluados

TÚNELES	Cumplimiento de una Correcta Iluminacion
Cerro Santa Ana	NO
Cerro El Carmen	NO
San Eduardo Dirección NORTE	NO
San Eduardo Dirección SUR	NO

Fuente: Elaboración Propia

4.8. PROPUESTA DE MEJORA DE NORMA ECUATORIANA

En el Ecuador la única normativa o manual existente relacionado con la iluminación de Túneles de Carretera es el REGLAMENTO TÉCNICO ECUATORIANO RTE INEN 069 “ALUMBRADO PÚBLICO”, en el numeral 4.5.3. *“Iluminación de Túneles”*.

En este reglamento nos dice que para el diseño de iluminación de Túneles de Carretera se debe aplicar la Norma CIE 88.2004, o alguna normativa equivalente.

Dentro de este Reglamento Técnico Ecuatoriano se menciona rápidamente las diferentes zonas de luminancia de luminancia dentro del túnel, pero no se explica a detalle como calcular el nivel de luminancia de cada Zona, ni la longitud de las mismas. En este reglamento también se habla de “Túneles Muy Largos” pero nunca nos menciona como distinguir cuando un túnel es “Muy Largo”.

PROPUESTA DE MEJORA

Después de analizar los resultados obtenidos en esta evaluación, y de observar que el Reglamento Técnico Ecuatoriano RTE INEN 069 “Alumbrado Público” no nos brinda las suficientes guías para el diseño de la iluminación en Túneles de Carretera. Se propone la creación de una Normativa Ecuatoriana exclusiva para el diseño de Iluminación en Túneles de Carretera. En donde se incluya paso a paso todas las guías

y procedimientos para llegar a un adecuado diseño de iluminación, tomando en cuenta características propias del país como el clima, los tipos de pavimentos más utilizados, las velocidades de circulación dentro del país, etc.

CAPITULO V

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

- De los valores de luminancia obtenidos de las mediciones realizadas en los túneles, se puede observar que existen variaciones del nivel de luminancia dentro de la Zona Interior de los mismos, la cual según la Normativa Técnica de Carreteras de España “Orden Circular 36/2015 debería ser un valor constante a lo largo de toda esta zona para evitar molestias en la vista de los usuarios; pero al realizar la evaluación visual de esta zona se encontró que varias luminarias se encontraban fuera de funcionamiento, por lo que podemos concluir en base a las *Figuras 19, 20, 21, y 22*, que el diseño del nivel de luminancia en la Zona Interior es ser correcto, pero el funcionamiento de las instalaciones de iluminación es deficiente.
- Basándonos en los valores de Luminancia de la Zona de Umbral calculados según la Normativa Española en las *Tablas 31, 34, 37, y 40*, y comparándolos con los niveles de Luminancia medidos *Tablas 32, 35, 38, 41*; y también basándonos en la presencia del Efecto Agujero Negro en todos los túneles evaluados *Tabla 42*, podemos concluir que ninguno de los túneles cumple con una correcta iluminación en la Zona de Umbral.
- En base a la *Figura 23*, ninguno de los túneles evaluados en esta disertación cumplen con la luminancia que deberían tener actualmente respecto a la Normativa Técnica de Carreteras de España “Orden Circular 36/2015.
- Al realizar una evaluación visual dentro de los Túneles del Cerro Santa Ana, Cerro Del Carmen, San Eduardo Dirección Norte y Sur, se encontró que muchas luminarias no se encontraban funcionando, y otras luminarias funcionaban de forma deficiente, por lo que podemos decir que uno de los principales inconvenientes dentro de la iluminación de estos túneles, es la falta de mantenimiento y servicio de los mismos.

- Los Túneles del Cerro Santa Ana y Cerro Del Carmen tienen varios años más de funcionamiento que los Túneles de San Eduardo, y en la comparación de los resultados obtenidos se nota una mayor diferencia de los niveles de luminancia existentes en estos 2 túneles mas antiguos, por lo que el estado y la antigüedad de las instalaciones podría ser una importante razón de la deficiente iluminación dentro de estos.
- Debido al crecimiento de la población que conlleva al aumento de edificaciones, a la modificación de estructuras aledañas a los túneles, y a la vegetación actual existente, se puede decir que el diseño actual de la iluminación de ciertos túneles podría variar al diseño realizado el momento de su construcción.
- Después de comprobar que no existen instrumentos de control del nivel luminancia en los túneles evaluados, se concluye que el nivel de luminancia es el mismo durante todas las horas del día, lo que puede producir molestias a los usuarios que circulan por el mismo, y también un sistema económicamente ineficiente de iluminación.

5.2. RECOMENDACIONES

- Realizar una intervención al nivel de iluminación actual de los Túneles del Cerro Santa Ana, Cerro El Carmen, y San Eduardo Dirección Norte y Sur, que incluye el mejoramiento en el diseño actual y mejoramiento de las instalaciones, para así evitar el Efecto Agujero Negro que existe actualmente en todos estos túneles, y para poder brindar la seguridad y confort adecuado hacia los usuarios de estos.
- Realizar una intervención de mantenimiento de los túneles evaluados dentro de esta disertación, para reemplazar las luminarias que no se encuentran funcionando, y las que se encuentran funcionando deficientemente.

- Se debe colocar Luminancímetros de Control en la vía de acceso a los Túneles del Cerro Santa Ana, Cerro El Carmen, y San Eduardo Dirección Norte y Sur, para poder tener un control eficiente del nivel de luminancia dentro de estos, lo cual tendría un impacto positivo tanto en la comodidad del usuario al circular a través de estos, como en el uso de energía eléctrica. Los Luminancímetros de control pueden ser encontrados en España en la empresa “TodoControl” con un valor de €3500, en el Ecuador ninguna empresa dispone de este equipo.

BIBLIOGRAFÍA

- ANT. (2012). REGLAMENTO A LEY DE TRANSPORTE TERRESTRE.
- AQinstruments. (21 de Junio de 2013). *Medidores de Luminancia*. Obtenido de <https://aqinstruments.wordpress.com/2013/06/21/medidores-de-luminancia/>
- BBC Mundo. (2016). *Las increíbles cifras del túnel de San Gotardo, el más largo del mundo*. Obtenido de http://www.bbc.com/mundo/noticias/2016/06/160513_internacional_tecnologia_tunel_san_gotardo_impresionantes_cifras_ms
- Bickel, J. (1982). *TUNNEL ENGINEERING HANDBOOK*. New York: VAN NOSTRAND REINHOLD COMPANY.
- Bickel, J. O., Kuesel, T. R., & King, E. H. (2004). *Tunnel Engineering Handbook*.
- CANALVIAJES. (2012). *El Túnel de Laerdal en Noruega, el más largo del mundo*. Obtenido de <http://canalviajes.com/el-tunel-de-laerdal-en-noruega-el-mas-largo-del-mundo/>
- Federal Highway Administration. (2009). *Technical Manual for Design and Construction of Road Tunnels*.
- fotografiaenfasis. (03 de Mayo de 2016). *La Fotografía*. Obtenido de <http://fotografiaenfasis.blogspot.com/2016/05/luminancia.html>
- GOSSEN. (2017). *GOSSEN*. Obtenido de <https://gossen-photo.de/en/mavospot-2-usb/>
- Llopis Serrano, G. (2013). *ingeo/túneles*. Madrid.

- Ministerio de Fomento de España. (2015). Orden circular 36/2015 sobre criterios a aplicar en la iluminación de carreteras a cielo abierto y túneles. España.
- National Fire Protection Association. (s.f.). *Standard for Safeguarding Construction, Alteration, and Demolition Operations*.
- Peña-García, A., Gil-Martín, L., Escribano, R., & Espín-Estrella, A. (2011). *A Scale Model of Tension Structures in Road Tunnels to Optimize the Use of Solar Light for Energy Saving*. Granada.
- Retos de la Ingeniería Civil. (2014). *Los túneles más largos del mundo*. Obtenido de <http://retosingenieriacivil-hoy.blogspot.com/2014/09/los-tuneles-mas-largos-del-mundo.html>
- Ridsen, C. (s.f.). *The geology and Dealing with it*. Obtenido de <http://www.ucmp.berkeley.edu/exhibits/caltrans/fourthbore2.php>
- Servicio Ecuatoriano de Normalización INEN. (2012). REGLAMENTO TÉCNICO ECUATORIANO RTE INEN 069 "ALUMBRADO PÚBLICO". Ecuador.
- The Department for Transport. (1999). *DESIGN MANUAL FOR ROADS AND BRIDGES: VOLUME 2: SECTION 2: PART 9: BD 78/99: DESIGN OF ROAD TUNNELS*.
- Thompson, J. A. (1998). *Criteria for Highway Tunnel Lighting Design*.

ANEXO

REGLAMENTO TÉCNICO ECUATORIANO RTE INEN 069 "ALUMBRADO PÚBLICO"

- b) Los sistemas de redes primarias monofásicas deben tener salida secundaria del tipo monofásicas trifilar 240/120 V o de acuerdo a los niveles de voltaje que disponga cada distribuidora.
- c) Deben ser potencias estandarizadas de transformadores que faciliten su adquisición.
- d) Los circuitos dedicados al alumbrado público deben llevar asociado un equipo de medida, que permita registrar la energía consumida en el alumbrado público.
- e) En sectores residenciales y pequeños comercios, la red eléctrica de distribución en bajo voltaje podrá ser compartida con las instalaciones de alumbrado público y el voltaje de alimentación será el voltaje fase nominal de la red.
- f) En los circuitos de iluminación compartidos con redes de uso general, se puede usar el voltaje propio de la red 208/120 ó 220/127 V trifásico o monofásico 240/120 V o de acuerdo a los niveles de voltaje que disponga cada distribuidora.
- g) En estos casos los operadores de red deben considerar, en sus normas de construcción, condiciones especiales de las estructuras de soporte de la red como: la separación, características mecánicas para soporte de cables, brazos, luminarias, herrajes y distancias de seguridad.

En las interdistancias (vanos de los cables de las redes eléctricas) se debe dar cumplimiento a los parámetros de iluminación de la vía, con los niveles de iluminancia mínimos promedio mantenidos y coeficientes de uniformidad exigidos en el presente reglamento.

- h) Los operadores de red en sus normas de construcción de redes en vías deben contemplar la localización de estructuras con base en estudios fotométricos, usando la información de luminarias certificadas con lámparas de las potencias usualmente utilizadas y eficacias lumínicas no menores a las establecidas en el presente reglamento. La separación de estructuras seleccionada debe ser la de la alternativa más económica en la vida útil del proyecto, teniendo en cuenta los criterios definidos en el presente reglamento. La ubicación definitiva de la estructura no debe estar por fuera de la interdistancia óptima en más o menos el 15%.
- i) Las autoridades competentes deben exigir el cumplimiento de esta normatividad de separación máxima de los postes en la construcción de las nuevas redes eléctricas de uso general, y podrán exigir la modificación de las mismas en el caso de incumplimiento.

4.5.3 Iluminación de túneles

4.5.3.1 El diseño de alumbrado de túneles debe cumplir con los requerimientos de iluminación para una percepción segura, oportuna y una seguridad en los niveles de movilidad de los conductores. Para la iluminación de túneles se debe aplicar una norma como la CIE 88.2004 u otra equivalente.

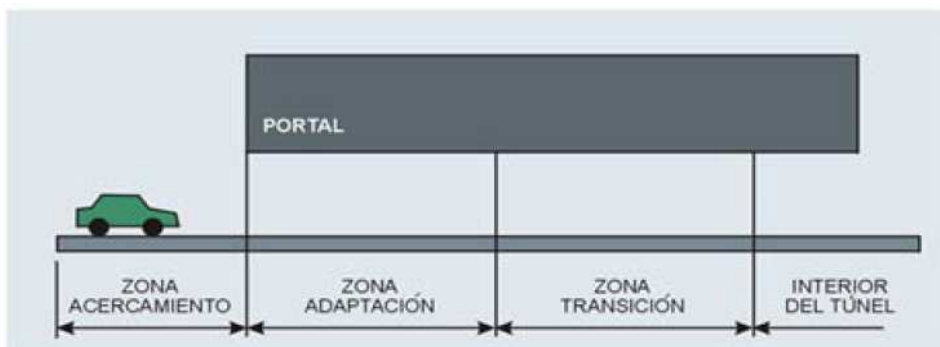
4.5.3.2 El objetivo de la iluminación de túneles es suministrar una apropiada visibilidad a los conductores, tanto en el día como en la noche. Los factores que contribuyen a disminuir la visibilidad deben ser determinados para cada túnel.

Los factores comprenden:

- Características de la vía de acceso y sus proximidades.
- Características de la vía en el túnel, paredes y techos.
- Características del portal del túnel.
- Condiciones ambientales y atmosféricas.
- Características del tráfico vehicular.
- Orientación del túnel con respecto al sol.

En la figura 23 se muestran las zonas que se deben tener en cuenta en el diseño de iluminación de túneles.

FIGURA 23. Zonas lumínicas de un túnel



Zona de acercamiento. Corresponde a la parte de la vía externa al túnel.

Portal. Corresponde al plano de entrada al túnel.

Zona de adaptación. Es la primera parte del túnel, durante el día se requiere suministrar un alto nivel de alumbrado.

Zona de transición. Área donde se hace la transición del alto nivel de alumbrado requerido en el umbral, al bajo nivel de la zona interior.

Zona interior. Es la parte más interna del túnel que requiere el suministro de un bajo nivel de alumbrado.

Zona de salida. La zona de salida es la parte del túnel en la que la visión del conductor que se aproxima a la salida, está influida predominantemente por la elevada luminancia exterior del túnel. La situación con vistas a la visibilidad y confort no es, durante el día, muy crítica porque los objetos en la zona de salida se mantienen claramente en silueta contra la salida brillante (ver nota 12).

4.5.4 Parámetros de diseño para iluminación de túneles

4.5.4.1 El diseño, cálculo e instalación de alumbrado de túneles se realizará de forma tal que se eviten los efectos de agujero negro, adaptación, cebrá y parpadeo o efecto flicker, considerando los siguientes parámetros:

- Cantidad y velocidad del tráfico.
- Clasificación del túnel.
- Condiciones de luminancia externa, tanto en el día como en la noche.
- Equipo eléctrico.

Para la calidad de la iluminación del túnel se deben cumplir los parámetros establecidos en el capítulo 4 de la norma CIE 189 2010.

NOTA 12. La longitud de cada zona varía con los parámetros de diseño en cada túnel. La longitud del umbral (zona interior adyacente al portal) y de la zona de transición o adaptación depende de la velocidad de diseño del túnel.

4.5.5 Clasificación de los túneles

4.5.5.1 Los túneles se clasifican según su longitud y para fines de alumbrado, en *túneles cortos* y *túneles largos*. Se define como túnel corto aquel que sin tráfico, las salidas y sus alrededores, son claramente visibles desde un punto situado fuera de la entrada a él. Un túnel puede tener hasta 50 metros de largo sin que se necesite alumbrado durante las horas del día. Si un túnel corto no es recto o si el tráfico es muy intenso, el efecto de silueta es menos marcado y puede ser necesaria una iluminación artificial. Los túneles que no se ajusten a la definición anterior, son considerados túneles largos.

4.5.5.2 Los túneles largos deben estar dotados de iluminación, debiéndose contemplar los alumbrados diurno, crepuscular y nocturno. En los accesos a este tipo de túneles se implantará alumbrado público, como mínimo, 300 m antes y después de la entrada y salida.

4.5.5.3 Para el alumbrado diurno y crepuscular, en túneles con tráfico en las dos direcciones, deben preverse tres escalones o niveles de iluminación a la entrada, el tramo central y otros tres escalones, idénticos a los de la entrada, para la salida del túnel, siendo el alumbrado nocturno constante para todo el túnel.

4.5.5.4 Cada escalón contemplará un tramo de túnel de 50 m de longitud, como mínimo, pudiendo alcanzarse hasta 200 m, dependiendo de la limitación en la velocidad de los vehículos. El tramo central tendrá medidas concretas que dependerán de la longitud real del túnel.

4.5.5.5 Es necesario aclarar que el diseño de la iluminación del túnel se realiza de manera independiente en cada entrada. Si el túnel es de una sola dirección de circulación, solamente se considerará una zona de umbral y transición en la boca de entrada, siendo también constante para todo el túnel el alumbrado nocturno. Si el túnel tiene dos direcciones de circulación, se deben considerar, tanto a la entrada como a la salida, zonas de umbral y sus correspondientes transiciones.

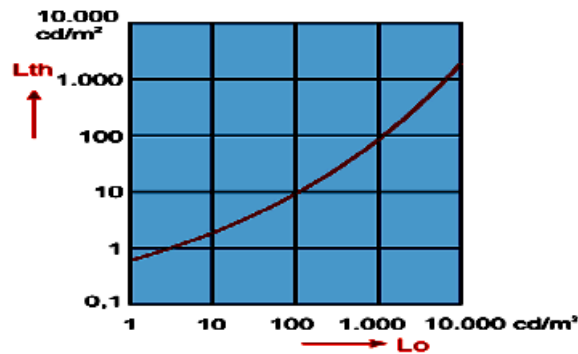
4.5.5.6 Por razones de seguridad se debe tener alumbrado de emergencia en el caso de túneles de longitudes superiores a 100 m o en aquellos en los que exista algún punto en su interior desde el que no se pueda ver ninguna de las bocas del túnel.

4.5.6 Requisitos para la iluminación de túneles durante el día

4.5.6.1 Zona de adaptación o zona de umbral. El conductor que se acerca a la entrada de un túnel durante el día, ha de adaptar sus ojos para pasar de un alto nivel de luminancia que prevalece en el exterior, a la luminancia del interior. Por consiguiente, si el túnel es largo y el nivel de luminancia dentro de él es mucho más bajo que el de fuera, el túnel se presenta como un "hueco negro" Por lo que no será visible ningún detalle de su interior. Esto se conoce como **deslumbramiento** por ausencia de luz y su duración fisiológica es mayor que cuando se hace la transición contraria.

4.5.6.2 Para hacer visibles los obstáculos dentro del túnel hay que aumentar el nivel de luminancia de su entrada, esto es, en la zona de adaptación (***L_{th}***). El nivel de luminancia requerido en esta zona depende del nivel exterior (***L_o***), que en un día soleado puede alcanzar unas 8 000 cd/m² (Esta luminancia es equivalente a una iluminancia horizontal del orden de 100 000 luxes). (Ver figura 24.a).

FIGURA 24.a. Nivel de iluminancia en túneles



4.5.6.3 La longitud de la zona de adaptación o zona de umbral depende principalmente de la distancia a la cual pueda ser visible un objeto crítico (objeto crítico es aquel que tiene 0,2 X 0,2 m y contraste de 20%) en el 75% de los casos y a una distancia que depende de la velocidad permitida dentro del túnel. Además, el tiempo de visión debe ser al menos 0,1 segundos.

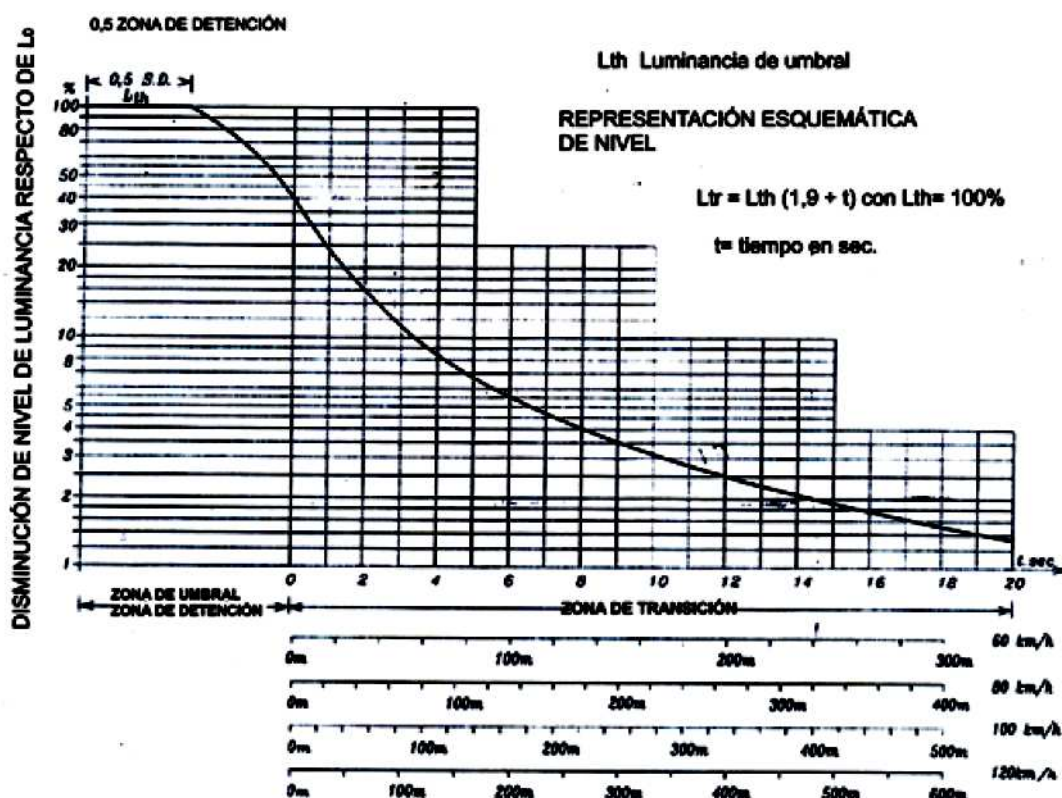
Una forma para reducir el nivel de luminancia de la zona de adaptación es disminuir el nivel de iluminación en la zona de acceso (fuera del túnel). Esto puede lograrse oscureciendo los alrededores de la entrada, utilizando colores oscuros en la superficie y muros laterales de la calzada y sembrando árboles y arbustos en los alrededores de la entrada.

La longitud total de la zona de umbral debe ser al menos igual a la distancia de parada. Durante la primera mitad de la distancia, el nivel de luminancia debe ser igual a L_{th} (valor de la luminancia de umbral a la entrada del túnel). Se recomienda que a partir de la mitad de la distancia de parada hacia delante, el nivel de luminancia se reduzca gradualmente, hasta un valor, al final de la zona de umbral, igual a 0,40 L_{th} (ver figura 24.b). La reducción gradual puede hacerse en escalones.

Sin embargo, los niveles de luminancia no deben caer por debajo de los valores correspondientes a la disminución gradual recomendada y dibujada en la figura 24.b, según la norma CIE 88 -2004.

Para el cálculo de la luminancia de umbral L_{th} se debe consultar el numeral 6.2 (método del contraste percibido) y el Anexo A.1 (método L20) de la norma CIE 88 2004.

FIGURA 24.b. Gradiente de luminancia en el túnel (figura 6.6 de la norma CIE 88 de 2004)



- a) *Zona de transición.* El conductor que entra en un túnel, necesita cierto tiempo para que sus ojos se adapten a un nivel inferior de luminancia. Por consiguiente, es preciso que la transición al nivel más bajo reinante en el túnel se haga gradualmente.

La reducción de la luminancia de la calzada en la zona de transición sigue, en principio, la curva mostrada en la figura 24.b. La zona de transición comienza al final de la zona de umbral ($t = 0$).

Esta curva puede ser sustituida por una curva escalonada con niveles que nunca deben caer por debajo de la curva continua. La relación de luminancia máxima permitida al pasar de un escalón a otro es de 3.

El último escalón no debe ser mayor de dos veces la luminancia de la zona interior.

Como el campo de visión del conductor está formado por el interior del túnel, puede ser aconsejable una zona de transición mayor a fin de contrarrestar un segundo efecto de agujero negro.

Para un confort de conducción adicional, en el caso de la curva escalonada, la longitud de la zona de transición puede, a su término, extenderse 1 a 2 segundos sobre la longitud que sigue a partir de la curva CIE.

- b) *Zona interior.* La luminancia media de la calzada en la zona interior del túnel está dada a continuación en función de la distancia de parada y del caudal de tráfico. La zona interior de un túnel muy largo consiste en dos subzonas diferentes. La primera subzona corresponde a la longitud que es cubierta en 30 segundos y debe ser iluminada con los niveles de "túneles largos".

La segunda subzona corresponde a la longitud restante y debe ser iluminada con los niveles de "túneles muy largos".

Los valores recomendados de luminancia en cd/m^2 se dan en las tablas 29 y 30.

TABLA 29. Valores de luminancia en la zona interior (túneles largos)

Distancia de parada	TÚNELES LARGOS	
	Caudal de tráfico	
	Bajo	Elevado
160 m	6	10
60 m	3	6

Fuente CIE 88. 2004 tabla 6.7.1

TABLA 30. Valores de luminancia en la segunda parte de la zona interior (túneles muy largos)

Distancia de parada	TÚNELES MUY LARGOS	
	Caudal de tráfico	
	Bajo	Elevado
160 m	2,5	4,5
60 m	1	2

Fuente CIE 88.2004 tabla 6.7.2

Para distancias de parada que se encuentren entre las cifras establecidas y caudales de tráfico intermedios (entre bajo y elevado), puede usarse una interpolación lineal.

El caudal de tráfico usado en las tablas anteriores puede definirse como sigue:

TABLA 31. Clasificación del caudal de tráfico

Caudal de tráfico (vehículos/hora/carril)	Tráfico unidireccional	Tráfico bidireccional
Elevado	>1.500	>400
Bajo	<500	<100

Fuente CIE 88.2004 tabla 6.7.3

- c) *Caudal de tráfico.* El número de vehículos que pasan por un punto específico en un instante establecido en dirección o direcciones establecidas. En el diseño del túnel, se usarán el tráfico en horas punta, vehículos por carril y por hora.
- d) *Zona de salida.* Durante el día, para un conductor que se encuentra dentro del túnel, la salida se presenta como si fuera a entrar a un agujero brillante, contra el cual los obstáculos son claramente visibles como siluetas.

Puesto que la adaptación de un nivel bajo de luminancia a otro mayor se efectúa rápidamente, las exigencias de iluminación de la zona de salida son mucho menos severas que las de la zona de entrada.

En el caso de túneles unidireccionales y con la finalidad de asegurar una iluminación adecuada para los pequeños vehículos y una visión hacia atrás suficiente mediante los espejos retrovisores,

la zona de salida debe ser iluminada del mismo modo que la zona interior del túnel. En situaciones en las que se esperan peligros adicionales cerca de la salida del túnel y en túneles en los que la zona interior es larga, se recomienda que la luminancia durante el día en la zona de salida aumente linealmente sobre una longitud igual a la distancia de parada (antes del portal de salida), desde el nivel de la zona interior a un nivel 5 veces al de la zona interior a una distancia de 20 m del portal de salida.

En el caso de túneles bidireccionales o de dos sentidos de circulación, la salida debe iluminarse de manera idéntica a la entrada.

4.5.7 Requisitos para la iluminación de túneles durante la noche

4.5.7.1 En cuanto a los requerimientos del alumbrado durante las horas de la noche, la situación es inversa a la de las horas del día. El nivel de luminancia fuera del túnel es entonces menor que el de adentro y el problema de adaptación al agujero negro puede aparecer en la salida del túnel. No habrá dificultades, mientras la relación entre la luminancia dentro del túnel y fuera de él sea menor de 3.1.

4.5.7.2 Esta condición no se logra si la iluminación del túnel sigue funcionando con la misma intensidad durante la noche. El alumbrado adicional instalado en las distintas zonas para cubrir las exigencias de la luz diurna debe apagarse. Si el túnel se encuentra en un tramo de carretera iluminado, la calidad del alumbrado dentro del túnel debe ser al menos igual al nivel de iluminación, uniformidades y deslumbramiento de la carretera de acceso. La uniformidad durante la noche en los túneles satisfará los mismos requisitos que el alumbrado diurno.

4.5.7.3 Si el túnel es parte de un tramo de carretera que no está iluminado, la luminancia media de la superficie de la calzada interior no debe ser menor de 1 cd/m^2 , la uniformidad global al menos del 40% y la uniformidad longitudinal al menos el 60%.

4.5.7.4 Las vías de salida con poca iluminación deben equiparse con una instalación de alumbrado aceptable, en una longitud de unos 200 metros desde la salida del túnel, hacia afuera, para ayudar a la adaptación de los ojos del conductor.

4.5.8 Visibilidad dentro de un túnel iluminado

4.5.8.1 La altura de montaje de las fuentes luminosas en los túneles es inferior a la empleada en la iluminación de vías. Hay, por consiguiente, mayor posibilidad que una luminaria no apantallada produzca deslumbramiento.

4.5.8.2 Un apantallamiento adecuado es lo más importante en la zona central, por ser relativamente oscura. En la zona de umbral, con su alto nivel de luminancia, el apantallamiento no es tan exigente y la luminancia de las fuentes puede ser más alta. Esto contribuirá también a que el conductor se dé cuenta que está entrando en un túnel. Una diferencia de colores entre la luz de día y el color de la fuente luminosa a la de la entrada del túnel sirve al mismo propósito.

4.5.9 Restricción del efecto de parpadeo o "flicker"

4.5.9.1 Se han experimentado sensaciones de parpadeo o flicker, cuando se conduce a través de cambios periódicos espaciales de luminancia. El parpadeo es el resultado de las propias luminarias que aparecen y desaparecen en la periferia del campo de visión del automovilista. En condiciones específicas el flicker puede causar incomodidad que a veces puede ser severa.

El grado de falta de confort visual experimentado debido al efecto flicker depende de:

- a) El número de cambios de luminancia por segundo (frecuencia de parpadeo o flicker).
- b) La duración total de la experiencia.
- c) La relación de la luminancia de pico (luz) a valle (oscuridad) dentro de cada periodo (profundidad de modulación de luminancia), y la pendiente del incremento (tiempo de subida)

4.5.9.2 Los tres factores mencionados dependen de la velocidad del vehículo y de la separación entre luminarias, (c) depende también de las características ópticas y de la separación entre luminarias.

4.5.9.3 En el alumbrado, casi en línea continua, cuando la distancia entre el final de una luminaria y el inicio de la siguiente luminaria es menor que la longitud de las luminarias, el efecto de falta de confort por el flicker es independiente de la frecuencia.

4.5.9.4 La frecuencia de flicker se calcula dividiendo la velocidad en m/s por la separación entre luminarias (centro a centro, en m). Por ejemplo, para una velocidad de 60 km/h (16,6 m/s) y una separación de 4 m, la frecuencia será de $16,6/4 = 4,2$ Hz.

En general, el efecto flicker es despreciable a frecuencias inferiores a 2,5 Hz y superiores a 13 Hz.

4.5.9.5 Cuando la frecuencia está entre 4 Hz y 11Hz, y tiene una duración de más de 20 s, puede aparecer falta de confort si no se toman ciertas medidas. Se recomienda que, en instalaciones en las que la duración es de más de 20 s, se evite el intervalo de frecuencias entre 4 Hz y 11 Hz, particularmente cuando se utilizan pequeñas fuentes luminosas con elevada luminancia. Luminarias de gran tamaño con bajos gradientes en la distribución de la luz (como por ejemplo, luminarias con tubos fluorescentes montadas longitudinalmente) usualmente conducirán a una menor falta de confort.

4.5.10 *Guía visual dentro de un túnel*

4.5.10.1 Es fácil conseguir una guía visual a lo largo del túnel. Esto se consigue colocando las fuentes luminosas según una disposición lógica. Es aconsejable instalar por lo menos una línea continua de fuentes luminosas en cada sentido del flujo del tráfico, haciendo coincidir los ejes longitudinales de las luminarias con cada uno de los ejes de circulación dentro del túnel adicionalmente, se consigue una mayor guía visual.

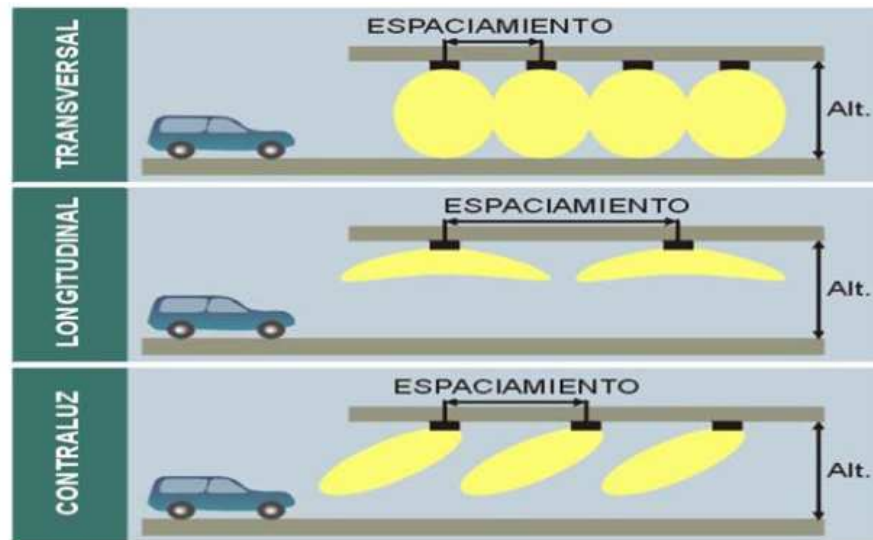
4.5.10.2 Para una buena guía visual, es deseable que haya una pequeña diferencia de luminancia o color entre la calzada y las paredes. Deben evitarse superficies con reflexión especular. Para paredes se recomienda un tinte pastel suave, por ejemplo, un verde claro. El acabado de las paredes debe ser de material fácil de lavar. El techo de los túneles se ennegrece fácilmente, básicamente por la contaminación con los gases residuales de la combustión en los motores de los vehículos, en tanto que limpiarlo resulta difícil.

4.5.10.3 Esto sin embargo, no es una desventaja, al contrario, es conveniente, porque el techo ocupa solamente una pequeña parte del campo de visión y un techo oscuro da al túnel la impresión de mayor altura. Recuérdese que el efecto silueta se da principalmente entre las paredes del túnel y los objetos (obstáculos) dentro de él.

4.5.11 *Sistemas de iluminación de túneles*

4.5.11.1 En el alumbrado de túneles se pueden usar luminarias con diferentes tipos de distribución luminosa. Hay tipos que son los más representativos cuyas explicaciones son:

FIGURA 25. Tipos de luminarias para túneles, según su distribución luminosa



- a) *Distribución transversal.* Las intensidades luminosas se irradian principalmente en ángulo recto con el eje longitudinal del túnel.

El ejemplo más familiar de este alumbrado es la hilera continua de tubos fluorescentes. El sistema óptico que se utiliza en este caso, es muy adecuado para el empleo con fuentes lineales de luz.

Las ventajas de dicho sistema son: buena orientación visual, deslumbramiento mínimo, penetración luminosa entre vehículos, y disposición de conmutación sencilla. Sus desventajas son: eficiencia moderada por el corto espaciamiento de las luminarias y posible efecto de parpadeo, que se produce en el caso de no planificarse debidamente la conmutación de las luminarias.

- b) *Distribución longitudinal.* Las intensidades luminosas se irradian más o menos en paralelo al eje longitudinal del túnel y el sistema óptico que se usa debe ser adecuado para el empleo de las fuentes puntuales de luz, como son las lámparas de sodio de alta presión tubulares.

Las ventajas de este sistema son: un mayor rendimiento de la distribución lumínica para obtener los niveles de luminancia adecuados y el gran espaciamiento entre luminarias. Sus desventajas son: la posible creación de sombras, la irregular luminancia de las paredes y el hecho de que la conmutación nocturna exige luminarias de doble lámpara o accesorios de reducción de intensidad.

- c) *Distribución contraluz.* Esta distribución a contraluz consiste en colocar luminarias con una distribución de la intensidad luminosa dirigida en contra de la dirección del flujo de tráfico. Se caracteriza por producir un alto contraste negativo de los objetos situados en la vía debido a que la luminancia de los planos que mira el conductor es muy baja. Garantiza una muy buena percepción de contrastes, una eficiencia en luminancia mayor a los sistemas anteriores lo que conduce a una disminución en la potencia eléctrica instalada, un adecuado nivel de deslumbramiento.

Para tener las ventajas descritas se deben cumplir con los siguientes requisitos:

- La parte de las paredes con alta luminancia debe limitarse a una altura de 1 m para reducir la iluminancia vertical (E_v) de los obstáculos.
- La intensidad luminosa emitida por la luminaria en la dirección del tráfico debe limitarse al máximo.
- La distribución fotométrica debe ser tal que el ángulo vertical del haz sea alto, pero en lo posible inferior a 60° y las intensidades entre 70° y 90° debe mantenerse tan baja como sea posible, con el fin de evitar el deslumbramiento.

Esta distribución se utiliza preferencialmente para iluminar la zona de umbral y las zonas de transición de los túneles unidireccionales. En el caso de túneles bidireccionales se restringe a los túneles largos provistos con zona interior entre las dos bocas de entrada.

4.5.12 Equipos para iluminación de túneles

4.5.12.1 La localización y tipo de lámpara a utilizar en la iluminación de túneles depende del diseño específico del túnel. Las lámparas para la iluminación de túneles deben tener alta eficacia y larga vida.

Las luminarias deben cumplir los siguientes requisitos:

- Robustas, con un riesgo mínimo de daño, tanto por el tráfico como por la limpieza.
- El grado de protección debe ser mínimo de IP 66, de tal manera que permita lavarlas con agua a presión.
- De fácil acceso y mantenimiento.
- Propias para el control adecuado de la luminancia de la fuente luminosa.
- Provistas de prensaestopas para salida y entrada de cables, así como de los elementos de protección contra corto circuitos.
- Respecto de la distribución luminosa, debe ser tal que permita cumplir con los parámetros de iluminación exigidos para iluminar las diferentes zonas del túnel.
- Las luminarias deben tener una protección contra los impactos mínimo de IK 08.

4.5.13 Control automático del alumbrado de túneles

4.5.13.1 El alumbrado de un túnel debe ser diseñado para que sea compatible con un nivel máximo de iluminancia exterior (alrededor de 100 000 lux), se necesita asegurar tanto desde el punto de vista económico, como del confort visual, que los niveles de iluminación dentro del túnel, se ajusten automáticamente a las variaciones de la iluminación exterior.

4.5.13.2 El sistema de mando del alumbrado debe poseer la flexibilidad funcional deseada para reaccionar a las modificaciones más súbitas en la luminosidad ambiente. Ejemplo: es típico que el tiempo de ascenso en régimen máximo de eficacia luminosa de la lámpara de descarga, sea mayor de 3 minutos para las lámparas de sodio baja presión. Sin embargo, cambios bruscos pueden intervenir en la claridad del cielo, como consecuencia de los movimientos del sol al interponerse obstáculos como una montaña, una edificación, pero no se tendrán en cuenta modificaciones rápidas y efímeras de L20°, como las debidas a nubes. Por el contrario, será preciso reaccionar con un retardo razonable a cualquier cambio rápido de L20°, provocado por la salida del sol o la puesta de sol detrás de los edificios sobre las montañas.

4.5.13.3 Para obtener mejor control de la luminancia en la zona de adaptación y con vistas a tener en cuenta variaciones debidas al estado de bueno o malo del sistema de mantenimiento del túnel, se instala un segundo luminancímetro. Mide el nivel de luminancia en las zonas de adaptación y transmite estos valores al sistema de gestión de las luminarias, a fin de adaptar el régimen (soleado, nublado, oscuro) a la relación L_{th} / L_{20° elegido.

4.5.13.4 Para la zona interior, en el caso de alumbrado por tubos fluorescentes alimentados por balastos electrónicos de alta frecuencia que permiten la variación continuada del flujo luminoso, la luminancia inferior es medida por medio de un tercer luminancímetro, a fin de tener en cuenta variaciones de luminancia resultante del estado de mantenimiento (bueno o malo). Este luminancímetro mide el nivel de luminancia en la zona interior del túnel envía la información al microprocesador central, que conserva en memoria el nivel de luminancia a mantener en la zona interior, y el microprocesador da la orden al variador de adaptar el nivel de luminancia al nivel previamente programado, cualquiera que sea el estado de mantenimiento de la instalación de